

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 10-096610

(43)Date of publication of application : 14.04.1998

(51)Int.Cl.

G01B 11/24  
G01M 11/00  
G01S 7/48  
H01S 3/105

(21)Application number : 09-030863

(71)Applicant : IMRA AMERICA INC

(22)Date of filing : 14.02.1997

(72)Inventor : SUCHA GREGG D DR  
FERMANN MARTIN E DR  
HARTER DONALD J DR

(30)Priority

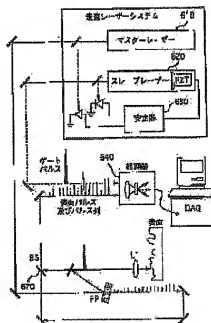
Priority number : 96 602457 Priority date : 16.02.1996 Priority country : US

(54) COMPARISON METHOD FOR LASER PULSE, SCANNING METHOD FOR HIGH SPEED LASER, HIGH SPEED SCANNING LASER DEVICE, SHORT PULSE LASER DEVICE, DISTANCE MEASURING DEVICE, ELECTRIC OPTICAL SAMPLING/OSCILLOSCOPE, SHORT PULSE LASER STABLE CONTROL METHOD

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a method and a device for time scanning using super short pulse width laser generating by minimum (micron) mechanical operation and provide a method for calibrating with high accuracy timing of the order of femtosecond.

SOLUTION: The cavity length of one 620 of two lasers 610 and 620 is given a swing with a piezoelement PZT. Fabry-Perot etalon FP produces a timing pulse line from a single pulse of laser 610. A correlator 640 correlates the timing pulse line and the gate pulse from the laser 620 and produces a calibration time scale, which can be applied much in the field requiring a high grade high speed scanning and time calibration. For example, it can be applied for surface measurement, charge dynamics measurement of semiconductor, electric optical test of ultrahigh speed electron/photoelectric device, reflectivity measurement in optical time region, electric-optical sampling/oscilloscope, etc.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 20.12.2000

[Date of sending the examiner's decision of] 28.05.2004

rejection]

[Kind of final disposal of application other than  
the examiner's decision of rejection or  
application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number] 3688841

[Date of registration] 17.06.2005

[Number of appeal against examiner's decision of  
rejection] 2004-17611

[Date of requesting appeal against examiner's  
decision of rejection] 26.08.2004

[Date of extinction of right]

## DETAILED DESCRIPTION

## [Detailed Description of the Invention]

[0001]

[Field of the Invention] This invention belongs to the technical field of ultrashort pulse width-of-face laser, and belongs to the equipment for performing the mechanical especially minimum (namely, micron scale) actuation, and the technical field of an approach. This invention can apply this approach also to an ordinary time scan method again also to the above-mentioned time scan method about the approach of using it for the timing calibration of high degree of accuracy (namely, sub picosecond). Even if it divides, this invention abolishes the need for a mechanical scan delay arm in the pump probe device of other formats containing a correlator, ranging, and three-dimensions imaging \*\* contour ring, tomography, and an optical time domain REFUREKUTOME tree (OTDR).

[0002]

[Description of the Prior Art] For the moment, repeatability is the range from 5MHz to about 1GHz, and the ultra high-speed laser oscillator is known, if there is capacity to generate the pulse width (laser) of the order of 10fs(es) (femtosecond) with the pulse energy of nano joule level. Such a short pulse is used for many application including time gating or metrology. In many of application of such a short light pulse, it is required for the set of a light pulse to be behind to the set of other light pulses. In here, a time lag needs a dramatically highly precise thing, for example, it is required to be the precision of the order of 10fs(es). The time lag of a short pulse is application of metrology etc., and are used for biological or medical imaging \*\*, high-speed photodetection and the optical sampling, the field reflectometer between light-hours, and the list.

[ many ] The usual approach for delay of a light pulse and a scan (scanning) is that only distance D moves this mirror physically with a certain mechanical means while reflecting a light pulse from a mirror. Distance D is defined as time delay  $\Delta T$  by the product with the velocity of light of  $3.0 \times 10^8$  m/s in a vacuum. namely,  $D = c \times \Delta T$  or  $D(\text{cm}) = 15 \times \Delta T(\text{ns})$

Delay of this kind is carried out to calling it "physical delay" here. Similarly, a scan shall point out systematic fluctuation of the difference of the arrival time between two light pulses here. For precise positioning of a mirror and a scan, various approaches and devices are already developed. For example, there is the following.

- Voice coil mold device (shaker) (R.F.Fork and F.A.Beiser, APPL Opt.17, 3534 (1978)).
- Rotating-mirror pair (Z.A.Yaza and N.M.Amer, Opt.Comm., 36, 406 (1981))
- The linear translator who has adopted the step motor (commercialized from many vendors)
- There is the following in physical delay of other types which are using the linear translator (D.C.Edelstein, R.B.Romney, and M.Scheuermann, Rev.Sci. Instrum.62, 579 (1990)) good

adjustment group delay (adjustable group delay) which has adopted the galvanometer.

- A scan galvanometer The adopted femtosecond pulse shaper (FPS) [ K.F.Kwong and D.Yankelevich, K.C.Chu and J.P.Heritage, and A.Denes, "400-Hz mechanical scanning optical delay line" Opt.Lett.18, (7) 558 (following) (1993) [ Kwong et al. and a brief sketch; K.C.Chu and K. Liu and J.P.Heritage, A. Denes, Conference on Laser and Electro-Optics, OSA Tech.Digest Series, Vol.8, 1994, paper CThI23.

- The maximum slack thing is taking a location large when delay with long \*\*\*\*\* is required for much demerits to the revolution glass block physical delay approach. For example, in order to obtain the delay for 10ns (nanosecond), migration of a 5 feet mirror is required. In addition, there are physical constraint and demerit again. When long delay is used, misalignment and a focus blank make measurement distorted. Although the problem of misalignment will be mitigated if a cube-corner-reflector reflector is used, the problem of a focus blank is not mitigated. The effect of this focus blank tends to occur, when the scan amplitude is equivalent to most part of the confocal parameter of a light beam. The time lag for 10ns needs propagation in 10 feet (about 3m) free space. So, in order to suppress the effect of a focus blank to the minimum, a confocal parameter (ZR) must be 10 times, i.e.,  $ZR = 30m$ , this value (10 feet) about. For this reason, the wavelength of 1550nm requires a 12mm beam radius ( $w_0$ ). Now, in many cases, it will become large in a rather fantastic way.

[0003] The need for moving a mirror greatly is reduced by passing the delay line repeatedly (multi-passing shot). (For example, according to the double passing shot of the delay line, the travel of the mirror needed can be reduced by half.) However, the problem of a focus blank is not mitigated depending on this. By multi-passing shot, an alignment activity will become more complicated and the original problem that optical loss increases will arise.

[0004] However, another limit about the rate of a scan (scanning rate) and scan frequency is simultaneously solvable. In order to obtain the "real-time" display of on-going measurement, in many cases, it is desirable to send a signal on the average, while scanning quickly (above 30Hz). With scan frequency high in this way, a scanning zone will still be restricted, the maximum output of the scanning zone attained until now — Scan FPS — they are 100ps(es) (picosecond) at the rate (rate of a scan) of 100Hz using law (Kwong et al.), a scanning zone — and — if some also make scan frequency increase more than by this, the oscillation of a high level may occur and actuation of laser may stop or realizing A revolving glass block prevents this oscillating problem, and although it has the capacity to gather a higher scan speed, it cannot adjust a scanning zone at all. Furthermore, since these (revolution glass block) bring about fluctuation of distribution of group velocity, they are unsuitable. [ of using it for the pulse of width of face of less than 100 fses ]

[0005] In addition to physical delay, the time scan method which does not need a mechanical motion at all is introduced. For example, there is the following.

- free scan laser (it Black(s) A. —) R. B.Apte and and D.M.Bloom, Rev.Sci, Instrum.63, and

3191(1992); K.S.Giboney, S.T.Allen, M.J.W.Redwell, and J.E.Bowers; " — Picosecond Measurements by Free-Running Electro-Optic Sampling." IEEE Photon.Tech.Lett., pp.1353-5.Nov.1994; J.D.Kafka and J.W.Pieterse, and M.L.Watts; "Two-color subpicosecond optical sampling technique." Opt.Lett., 17, and pp.1286-9, Sept.15, 1992 (following) [ Kafka ] et al. and abbreviated name; M.H.Ober, G.Sucha, and M.E.Fermann; "Controllable dual-wavelength operation of a Femtosecond neodymium fiber laser." opt.Lett.20, p.195-7, Jan.15, and 1995.

— The step mirror delay line which has adopted the acoustooptics deflector (deflecting system) as a distributed element (R.payaket, S.Hunter, J.E.Ford, and S.Esener; "Programmable ultrashort optical pulse delay using an acousto-optic deflector." Appl.Opt., 34, No.8, pp.1445-1453, Mar.10, and 1995).

— Torsion of RF phase between two mode locked lasers (D.E.Spence, W.E.Sleat, J.M.Evance, W.Sibbett, and J.D.Kafka; "Time synchronization measurements between two self-modelocked Ti:sapphire lasers." Opt.Comm., 101, pp.286-296, Aug.15, 1993).

[0006] According to these approaches like a non-machine, rapid scanning is especially possible. By such free scan laser, the span (width of face) covering the repetitive whole period of laser is obtained. For example, it is the repetitive frequency  $\nu_1$  from which the well-known free scan laser system shown in drawing 1 has the master laser 10 and the slave laser 20 with mutually different mold cavity length, and both 10 and 20 differ mutually. And  $\nu_2$  A pulse train is generated. The scan frequency is frequency difference  $\Delta\nu = \nu_1 - \nu_2$ . Since it is equal, it is set as a desired value by adjusting the mold cavity length of the slave laser 20 to predetermined die length. Correlator (correlator) 40 generates a signal from the cross-correlation between two laser. From now on, the information about the timing between these two laser will be acquired, and a trigger signal will be given to the data acquisition electronic instrument 50. For example, according to Kafka et al., it was set up so that two independent mode locking titanium:sapphire laser 10, i.e., master laser, and the slave laser 20 (each nominal repeatability is 80MHz) might have a mutually different repetitive frequency (about 80MHz). It originated in offset of a repetitive frequency and scanned through each other by 100kHz offset frequency  $\Delta\nu$  about. This offset frequency may be stabilized to a local RF oscillator. The total scanning zone had been about 13ns since laser repeatability was near 80MHz. So, the time amount scan was attained, without completely using the delay line which moves mechanically. The calibration of timing was attained by the cross-correlation of two laser beams reflected from the mirror 30 into nonlinear crystal (for example, correlator 40). The signal acquired as a result was used for the trigger data acquisition unit 50 (for example, oscilloscope), having sent it. It is reflected in another mirror 60 and the laser-beam output from laser 10 and 20 is also received by the metering device 70 which conducts measurement and an experiment of the request which used the laser beam.

[0007] By the following two reasons, data acquisition time amount is very long, and the greatest fault of this technique is this thing.

1. The fixed scanning zone : the scanning zone is being fixed to the inverse number of the

repetitive frequency (namely, round trip time) of laser.

2. --- dead-time: --- instead of [ of the pulse space for 13ns / all ] --- 100ps and 10ps(es) --- it tends to be alike and an interest tends to flow --- it comes out. So, it is utilized for 10 microseconds (microsecond) only 1 mere% (or 0.1%) of a certain scan time, but the 99 remaining% (99.9%) is a "dead time." therefore, data acquisition time amount --- 100 times and 1000 times --- it is alike and increases.

[0008] It is suggested that it can avoid this selectively if Kafka et al. has mentioned these limits and the laser of higher repeatability (for example,  $\nu_{\text{uo}} = 1\text{GHz}$ ) is used. However, in order to be many application as which very various scanning zones are required, it is hard to accept this solution. For example, pump probe measurement of a semi-conductor is often performed over various time amount range. The life of the carrier (namely, an electron and an electron hole) of a semi-conductor is the order for several nanoseconds, and 1GHz laser cannot be accepted at all. Also when the following pulse arrives, it is because the residual carrier by the former laser pulse still exists. In order to still see simultaneous extremely high-speed dynamics, it is often desirable to zoom in a narrower time scale. So, the flexibility of selection of a scanning zone demanded by many application is missing at the free scan laser technique. The approach for obtaining a large time dynamic range, without extremely long acquisition time starting is having the flexibility which can make timing adjustment coarsely and fine.

[0009] Also when mode locking is being carried out passively [ also when laser is carrying out mode locking actively ] by related research, in order to stabilize timing between two mode locked lasers, also in the case of the combination of a passive mode locked laser and an active mode locked laser, some kinds of approaches have been used. The approach used for synchronization is roughly divided and is divided into two types of (1) passivity optical means and (2) electronic stabilization. The highest synchronous precision With the passive optical means in which two laser is made to interfere through the optical effectiveness It is attained O. [ J.M.Evans, D.E.Spence, D.Burns, ] [ and W.Sibbet; "Dual-wavelength selfmode-locked Tisapphirlasers." ] Opt.Lett., 13, and pp.1074-7, Jul.1, 1993; M.R.X.de Barros and P.C.Becker; "Two-color synchronously mode-locked femtosecond Tisapphire laser." Opt.Lett., 18, and pp.631-3, Apr.15, 1993; D.R.Dykaar and S.B.Darak; "Sticky pulses:two-color cross-mode-locked femtosecond operation of asingle Tisapphire laser." Opt.Lett. and 18, pp.634-7, Apr.15, 1993 (following Dykaar et al. and abbreviated name); Z.Zhang and T.Yagi and "Dual-wavelength synchronous operation of a mode-locked Tisapphire laser based onself-spectrum splitting." Opt.Lett., 18, pp.2126-8, Dec.15, 1993. Such optical effectiveness (for example, mutual phase modulation etc.) generates the firm mode locking between two laser which synchronizes below with 1 pulse width (less than 100 femtoseconds). The time lag between laser of what brings about synchronization with these most exact is being fixed firmly. Therefore, in order to scan the time lag between these, the usual physical scan delay approach must be used.

[0010] According to the electronic stabilization which used simple RF phase detection, when

adjusting a relative time lag, flexibility is acquired most, but at present, these systems cannot maintain accuracy of timing better than 2 - 3 picosecond. It is sufficient, and such a system is marketed in order [ which is made to stabilize Ti:sapphire laser or takes the synchronization of two mode locking Ti:sapphire laser according to external reference frequency ] to carry out (Spectra-Physics Lok-to-Clock/TM system). If a pulse optical phase-locked loop (POPLL) is used, stabilization better than 100 femtoseconds will be attained. This is the hybrid optical electronic approach and is indicated by reference (S.P.Djaili, J.S.Smith, and A.Dienes, "Timing synchronization of a passively mode-locked dye laser using a pulsed optical phase locked loop" Appl.Physics.Lett., 55, pp.418-420, Jul.1989, following Djaili et al., and abbreviated name), such as DIJARI. By this reference, an electronic stabilization circuit brings about the timing error signal from an optical synchronous detector. However, this approach has covered the synchronization (lock) of the same timing adjustment as the passive optical approach. Adjustment of timing is possible at under one pulse width. So, probably, it is necessary in one laser beam to face using the POPLL method and deflect relative pulse timing as more greatly [ than one pulse width ] as possible to insert the physical delay line of a certain kind.

[0011] If the timing jitter of a laser proper is reduced, the engine performance of the timing stabilization by the RF method will be able to be raised. By putting two laser on the same possible environmental condition, a certain amount of reduction of the laser jitter of a proper is possible. Sticky pulsed laser is Dykaar et al. Although indicated, in order to carry out the pumping of the two fields divided spatially [ Ti:sapphire laser crystal ], the laser beam divided spatially is adopted. It is indispensable to this that two laser currently divided is sharing most elements in the same pump LD, a laser crystal, the space of air, and other mold cavities except for an end mirror. If it does in this way, since two laser experiences the same temperature fluctuation, the noise of pump LD, and turbulence, the difference in the jitter of repeatability will be controlled by minimum. If it carries out like this, even if the optical interference between two laser is weak, two or more pulses can be synchronized together (lock). The general principle of "environmental coupling" is applicable also to the laser of other formats containing a mode locking fiber laser. However, Dykaar et al. The object is locking two laser together and it should be cautious of it not being desirable in the place made into the object of this invention. It is because this time lag cannot be scanned. That is, it is because the timing pulse from two laser of the above-mentioned sticky pulsed laser by which coupling was carried out is not locked together through optical coupling and cannot be controlled independently.

[0012]

[Problem(s) to be Solved by the Invention] One object of this invention is the pulse iteration period TR like for example, "master" laser and "slave" laser, without needing a mechanical big motion of an optical element. It is offering the approach and equipment for scanning quickly the time lag between two mode locked lasers which enable actuation at the subinterval chosen at any cost continuously (scan). This is attained by adjusting the mold cavity length of one laser (for

example, slave laser) proper per micron, while using the electronic feedback circuit which acts as the monitor of the average timing (phase) between two laser continuously. In addition, it is desirable to convert RF stabilization of two laser (modification) so that the duty factor (duty cycle) of data acquisition may be improved greatly, some subintervals of a repetitive period may be covered and a relative time lag may be scanned unlike the free scanning method.

[0013] Another object of this invention is reducing the timing jitter produced by fluctuation of environmental conditions, such as turbulence of an oscillation or air, and a temperature change, to the minimum. Enabling it to control two laser independently, this uses the same element within the same container, and it is attained by constituting both laser so that a pumping may be carried out by the same pump LD. In the case of a fiber laser, this is especially attained by twisting two fibers around the same shaft (spool) together.

[0014] Further, another object is offering the approach of this invention which proofreads a scan-time scale with the precision of a sub picosecond, as used for association of the above-mentioned scan method and the above-mentioned scan method. For example, this invention can be used in order to take the cross-correlation over the pulse sequence obtained by the passage pulse from another laser (for example, slave laser) through the series of the optical element which carries out partial reflection of the pulse from one laser (for example, master laser) (a clo SUKORI rate is carried out).

[0015]

[The gestalt and example] of implementation of invention The example of this invention is described more by the detail below with reference to two or more drawings, and the same sign as a description is given to these drawings.

[Principle of high speed scan] this invention consists of two laser, the master laser 110 which has the almost same repeatability like free scan laser system as shown in drawing 2 (a), and the slave laser 120. However, unlike free scan laser system, the pulse output from the master laser 110 and the slave laser 120 can be thoroughly scanned no longer through each other. Rather, the master laser 110 with wavelength  $\lambda_1$  is the fixed repeatability  $\nu_1$ . What it is held or a drift is spontaneously carried out for is the repetitive frequency  $\nu_2$  of the slave laser 120, while being admitted. Near the repeatability of the master laser 110 is disturbed (dither). The oscillation of this repeatability is attained by changing the mold cavity length (L2) of the slave laser 120 for example, in the "high" cycle of the range from 30Hz to 1kHz. On the other hand, the "average" repeatability is followed thru/or controlled according to the repeatability of the master laser 110 with the stabilizer unit 130 including the "low-speed" phase-locked loop (PLL) circuit of the bandwidth of under scan frequency. The average time lag between the master laser 110 and the slave laser 120 is uniformly held with the stabilizer unit 130 which controls the mold cavity length of the slave laser 120. On the other hand, in order to scan the momentary delay between two laser, the high-speed oscillation signal output from a signal generator 140 is added with total vessel ( $\sigma$ ) with the control voltage output from the stabilizer unit 130. Flattery and



an oscillation of a repetitive frequency can realize the end mirror of the slave laser 120 for the indispensable voltage signal from anchoring and the signalling frequency generator 140 by impressing (to PZT) to a piezo-electric element (PZT) 121. The bandwidth of a PLL circuit needs to be under an oscillation frequency, otherwise tends to follow the master (frequency of slave laser 120) laser 110, and will block the scan of mold cavity length.

[0016] Drawing 2 (b) shows another example, in this example, the master laser 110 has also equipped PZT111 and both the laser 110,120 of both has the end mirror controlled by PZT111,121, respectively. In this case, the master laser 110 is disturbed to scan frequency, and the slave laser 120 follows "average" repeatability of the master laser 110 (truck). The mold cavity length of the master laser 110 is quickly disturbed by the signal generator 140, and the ballast-choke unit 130 is insisting upon the slave laser 120 to the desired average time lag.

[0017] Although repeated, in order that a PLL circuit may not interfere with a timing scan, it is required for the oscillation frequency to have exceeded the bandwidth of a PLL circuit. As an example explaining how the scan of mold cavity length acts, it is scan frequency  $f_S$  to PZT of the slave laser 120. A square wave is impressed. Then, the mismatch of mold cavity length is quickly changed with the function of the several 1 following time amount.

[0018]

[Equation 1]  $\Delta L(t) = \Delta L_0$  and  $S_q(f_S t)$

Here, it is  $\Delta L_0$ . It is the amplitude of the movement magnitude of a square wave, and  $S_q(x)$  is a square wave function. Thereby, the linearity scan delay of positive/negative arises for every one half of a scan cycle (chopping sea). When stable, the mismatch of the fixed mold cavity length of only  $\Delta L_0$  produces the following offset frequency of several 2.

[0019]

[Equation 2]  $\Delta \nu = -\Delta L / (2L^2)$  — or since it rewrites and mold cavity length is disturbed in a frequency high enough in  $\Delta \nu / \nu = -\Delta L / L$ , however a high speed scan, a pulse (both laser) cannot pass mutually. That is, scan frequency and the amplitude fulfill the several 3 following conditions.

[0020]

[Equation 3]  $f_S \gg \Delta \nu$  or  $f_S \gg \Delta L / (2L^2)$  In this case, probably,  $\Delta L / (2L^2)$  time lag  $T_d(t)$  which carries out time variation is proportional to the time quadrature of the mismatch of mold cavity length, as shown in the following several 4.

[0021]

[Equation 4]

$$T_d(t) = \frac{2}{c T_1} \int_0^t \Delta L(t') dt'$$

または

$$T_s(t) = \frac{2}{L} \int_0^t \Delta L(t') dt'$$

[0022] Here,  $c$  is the velocity of light in a vacuum, and an integral period is in the order of a scan cycle. Drawing 3 (a) shows the example of rectangular wave modulation, and the 1kHz square wave is impressed to one PZT among two laser in this drawing. Drawing 3 (a) The wave shown in - (c) is mismatch  $\Delta L$  of the mold cavity length depending on time amount  $L(t)$ . And momentary time lag  $TD(t)$  produced as the result is shown as a function of the time amount at the time of PZT of the slave laser 120 being impressed by various kinds of oscillation waves. Momentary repeatability  $\nu/2$  is shaken and the relative time lag is scanning the circumference forward and backward to linearity about time amount. A sum total scanning zone is the basic repeatability  $\nu$ . Or scan frequency  $f_s$  it depends and the scan amplitude follows the following several 5.

[0023]

[Equation 5]  $T_{max} = (\Delta L / 2L) - (1/f_s)$

Or it expresses on an offset frequency and is  $T_{max} = (\Delta L \nu / 2\nu) - (1/f_s)$ .

The rate of a scan is given by the following several 6 in the unit of (a ms/ms).

[0024]

[Equation 6] It is a unit convenient to use at  $R_{scan} = 2 \Delta L \nu / c$ ,  $R_{scan} = \Delta L / L$ , or a laboratory, and is  $R_{scan} = 109 \cdot \Delta L / L$  (ps/ms)

A "sampling grid" is given from the time pulse progress to per several 7 following round trip.

[0025]

[Equation 7] As the grand total of the spatial pulse advance per second, a  $\Delta L_{atg} = 2 \Delta L / c$  scan speed parameter can be defined, as shown in the following several 8.

[0026]

[Equation 8] Notice the rate of a  $\nu_{scan} = (2 \Delta L(t)) / TR = (\Delta L(t)) / L - c$  scan, a sampling grid, and the concept of a scan speed about the ability to apply also to free scan (free scan) laser. If an example is given,  $\nu = 100\text{MHz}$  will be obtained for nominal mold cavity length by the  $L = 1.5\text{m}$  laser couple. If the  $\Delta L = 15\text{micrometer}$  scan amplitude is assumed, offset  $\Delta L \nu = 1\text{kHz}$  frequency and  $R_{scan} = 104\text{ ps/ms}$  and  $\Delta L_{atg} = 100\text{fs}$  are obtained as a result. If mold cavity length is not disturbed, full pulse walk-off will happen in 1ms. Therefore, if the scan amplitude of 15 micrometers is used, in order to prevent total walk-off,  $f_s > 1\text{kHz}$  scan frequency is required.

[0027] Some possible scanning zones, the rate of a scan, and the sampling grid interval as a function of various scan speed parameters are indicated about the mode locked laser which has the repeatability  $\nu$  of 10MHz, 100MHz, and 1GHz in tables 1-3. A table 3 cannot show that total walk-off has arisen in most practical scan conditions about 1GHz laser, and, so, a time lag cannot exceed 1 nanosecond. Therefore, by less than 1GHz laser, the oscillation approach of this invention has desirable repeatability as the free scan laser approach.

[0028]

[A table 1]

10MHzレーザー (L=15m) に対する走査速度パラメーター

走査 周波数 $f_s$ (Hz)	$\Delta L_s$ ( $\mu m$ )	オフセット 周波数 $\Delta \nu$ (Hz)	走査率 (ps/ns)	グリッド (fs)	走査速度 (m/s)	走査範囲 (ps)
10	0.15	1	10	1	8	50
10	1.50	10	100	10	30	500
10	15.00	100	1000	100	300	5000
100	0.15	1	10	1	3	5
100	1.50	10	100	10	30	50
100	15.00	100	1000	100	300	500
1000	0.15	1	10	1	3	0.5
1000	1.50	10	100	10	30	5
1000	15.00	100	1000	100	300	50

[0029]

[A table 2]

100MHzレーザー (L=1.5m) に対する走査速度パラメーター

走査 周波数 $f_s$ (Hz)	$\Delta L_s$ ( $\mu m$ )	オフセット 周波数 $\Delta \nu$ (Hz)	走査率 (ps/ns)	グリッド (fs)	走査速度 (m/s)	走査範囲 (ps)
0.1	0.15	10	100	1	30	500
0.1	1.50	100	1000	10	300	5000
1.0	0.15	10	100	1	30	50
1.0	1.50	100	1000	10	300	500
1.0	15.00	1000	10,000	100	3000	5000
10.0	0.15	10	100	1	30	5
10.0	1.50	100	1000	10	300	50
10.0	15.00	1000	10,000	100	3000	500
100.0	1.50	100	1000	10	300	5
100.0	15.00	1000	10,000	100	3000	50

[0030]

[A table 3]

1 GHz レーザー ( $L=0.15\text{ m}$ ) に対する定常振幅ペラメーター

定常 周波数 $f_s$ (Hz)	$\Delta L_s$ ( $\mu\text{m}$ )	オフセット 周波数 $\Delta f$ (Hz)	走査率 (nm/nm)	グリッド ( $f_m$ )	走査速度 ( $\text{m/s}$ )	走査範囲 ( $\mu\text{m}$ )
0.1	0.15	1	1000	1	300	*
0.1	1.50	10	10,000	10	3000	*
1	0.15	1	1000	1	300	500
1	1.50	10	10,000	10	3000	*
1	15.00	100	100,000	100	30,000	*
10	0.15	1	1000	1	300	*
10	1.50	10	10,000	10	3000	500
10	15.00	100	100,000	100	30,000	*
100	0.15	1	1000	1	300	5
100	1.50	10	10,000	10	3000	50
100	15.00	100	100,000	100	30,000	500

[0031] Notes: \* in a table 3 shows total walk-off (it is 1 nanosecond at the maximum).

The square wave of a symmetry form does not necessarily call it the only desirable approach. In addition to rectangular wave modulation, drawing 3 (b) and drawing 3 (c) show the two another oscillation approaches (scheme). In order to obtain the scan of an one way, as shown in drawing 3 (b), a square wave (unsymmetrical square wave) can also be used. If it carries out like this, the unnecessary dead time of the scan to back will be able to be reduced. Although the indirectional scan is used with commercial Fabry-Perot interferometer, it is performing by the chopping sea rather than it is based on the square wave shown in drawing 3 (b) (indirectional scan).

[0032] Sudden change of the electrical potential difference in the first transition and the trailing edge of a square wave and a square wave may start the relief of a mechanical shock and PZT, and makes the linearity time scale of a scan different so distorted. A certain type (for example, smoothing of transition) of signal conditions which reduce these effects is desirable. Or as shown in drawing 3 (c), a sinusoidal voltage may be impressed to PZT. The advantage of a sinusoidal scan is that the shock which happens in relation to the sharp electrical-potential-difference transition in a square wave or a square wave, and a relief are avoidable. Moreover, distortion of the timing by PLL which is going to react to the mismatch of mold cavity length by which induction was carried out is also avoidable. That is, even if this stabilizer carries out a certain inductance to scan-time delay for a simple analog stabilization circuit, sinusoidal driver voltage will bring about a sine wave-scan characteristic. By these reasons, a sinusoidal scan is the simplest operationally. However, in a sinusoidal scan, the advantage which the square wave which produces the scan of an one way as shown in drawing 3 (b) has is not acquired. So, according to

the degree asked for simplicity, it becomes desirable to drive PZT by sinusoidal scan.

[0033] The scan speed parameter in a table 1-3 is obtained based on the rectangular wave modulation of the symmetry form of PZT. In a sinusoidal scan, a scanning zone and the rate of a scan will be changing a little. Although the delay depending on time amount is still searched for by the above-mentioned several 4, the modulation of mold cavity length is given by the following several 9.

[0034]

[Equation 9]  $\Delta L(t) = \Delta L_0 \cos(2\pi f t)$

The delay in that case is given by the following several 10.

[0035]

[Equation 10]

$TD(t) = (\Delta L_0 / L) - (1/2\pi f) \sin(2\pi f t)$

A sinusoidal scan (property) can be found as mentioned above. However, a time lag becomes 90 degrees to the location of PZT. In this case, notice a scan characteristic about not linearity but a certain kind of scale amending.

[0036] Although the laser scan technique indicated here is proved using the mode locking fiber laser of a couple, this technique is not limited to the two above-mentioned examples, and can be applied to many types of the mode locked laser which contains a solid state, diode laser, and diode laser rather.

The desirable example of this invention which has adopted two fiber lasers 210, i.e., master laser, and the slave laser 220 as [scan fiber laser system] drawing 4 is shown.

[0037] Both the laser 210,220 is the same laser diode LD. The pumping is carried out by 205 and the power of this laser diode is divided by the splitter SPL 206 to two laser. The master laser 210 is the Faraday rotator (polariscope) mirror FRM. Termination is formed of 215. On the other hand, the slave laser 220 is optical assembly PZT-FRM. Termination is formed of 225. This is FRM. Although it is almost the same as 215, it differs in that the mirror is attached on PZT. Two fiber lasers 210,220 are using the same mode locking optical system (namely, a wavelength plate  $\lambda/4$ ,  $\lambda/2$ , Faraday rotator FR, and polarization beam splitter PBS) as the component. Laser mode locking is put into operation with the saturation absorber SA, the output pulse from the low noise output port of both the laser 210,220 — respectively — photodiode PD-1 and PD-2 — therefore, it is detected. Both photodiodes are used with the actuation stabilizer 130.

[0038] Both the fiber lasers 210,220 have  $\nu_0 = 4.629\text{MHz}$  nominal repeatability. These are indicated by reference (M.E.Ferman, L.M.Yang, M.L.Stock, and M.J.Andrejco, and "Environmentally stable Kerr-type mode-locked erbium fiber laser producing 360-fs pulses." Opt.Lett., 10, pp.43-5, Jan.1984), such as a fur man. By this reference, nonlinear polarization EVORUSHON (NPE) is used as a mode locking device. Both the laser 210,220 has the same component except for the Faraday rotator mirror. That is, the master laser 210 is the Faraday rotator mirror FRM of a single package. Termination is formed by 215. On the other hand, the slave laser 220 is assembly

PZT-FRM whose mirror is the separated component which is attached on PZT although it is the same as that of FRM. Termination is formed of 225. The total displacement stroke of PZT currently used here is 40 microns. Coupling of both the laser 210,220 is carried out thermally and dynamically by being twisted around the same fiber spool 280 together (maintained at status idem). Moreover and both the laser 210,220 are the same pump LD diode LD. Since the pumping is carried out by 205, the pump noise in two laser correlates. The relative timing between both the laser 210,220 is set up and stabilized with the stabilizer 130 including a PLL circuit. If a stabilizer 130 works once and both the laser 210,220 is set as proper delay, an oscillation signal will be impressed to PZT of the slave laser 220 so that it may be made to scan. An oscillation signal is impressed by the signal generator 135, and in order to generate the signal for driving PZT, it is added to a stabilization signal. Output from a stabilizer 130. Or as the output of a stabilizer 130 includes both the stabilization signal and the oscillation signal, an oscillation signal may be generated from a stabilizer 130. Any laser 210,220 has two output ports relevant to the polariscope in a mold cavity, respectively. These two output ports are illustrated as two outputs of each PBS in drawing 4. These two laser outputs have a noise property which is extremely different mutually. That is, one side has a noise a little and another side does not almost have a noise. This is because of that of the optical marginal effectiveness that happening to this kind of laser is known (it originates in NPE). It is detected by photodiode PD-1 which generates the input to a stabilization circuit 130, and PD-2, and \*\* is this quiet output beam. Using an output beam quiet as an input to a stabilization circuit 130 helps to control a timing jitter to the minimum. [0039] A sinusoidal time amount scan is attained by the inverter which used this twin fiber laser system. Drawing 5 shows the twocycle of the cross-correlation scan between two fiber lasers 210,220 shown in drawing 4 (cross correlation scan). This cross-correlation scan is data collected by single-engined data acquisition without equalization. Drawing 5 shows in more detail the cross-correlation signal between two fiber lasers 210,220 which you are made to scan by the oscillation approach of this invention in the scan frequency of 106Hz, and scanning zone 200 picosecond. Here, drawing 5 is illustrating the scan for a twocycle fully, and shows the advance scan (FOWDOSUKYAN) and the retreat scan (back ward scan). It combines and the sinusoidal voltage currently impressed to the PZT controller and the trigger output of the signal generator 135 which has appeared as a square wave are illustrated. The plot of drawing 5 is obtained in the pulse from two laser 210,220 through the deformation synchronous detector which used the sum total frequency-mixing (sum free KENSHI mixing) within nonlinear crystal, i.e., a beta barium borate (BBO) crystal.

[0040] Mechanical delay (delay, delay) of a scan is used in one branch (one arm) of well-known correlator (correlator). However, mechanical delay is not used in the correlator of this invention. All scans are performed by the above-mentioned laser shaking method. Moreover, the sinusoidal voltage currently impressed to the PZT controller and the trigger output from a signal generator 135 are illustrated by drawing 5. The migration edge of PZT marked on the graph should care

about that the phase has separated only 90 degrees from the impressed sine wave to be able to expect from several 9 and several 10. Scanning zones are about 200 picoseconds in the scan frequency of 100Hz. This is equivalent to the 3cm physical delay with the repeatability of 100Hz. However, in this twin laser system, the same scanning zone as this is attained by moving only 2-3 mere micron of PZT(s) of the slave laser 220.

[0041] This cross-correlation method was used in order to measure the timing jitter between two laser 210,220. The calibration of timing is performed by \*\*\*\*(ing) a glass etalon with a thickness of 2mm which makes the pulse train from which only 20 picoseconds were separated to one branch of correlator. These pulse trains are on the scan in drawing 5, and can be checked by looking clearly. The time scale which extended the same scan is illustrating drawing 6. The duplicate of two pulses (one laser has a satellite pulse) which were generated by \*\*\*\*(ing) a 2mm glass etalon to one branch of correlator from this drawing and which are vacating spacing for near very much, and the pulse of this couple can be grasped. Only 20 picoseconds to which the pulse of this couple supports the optical thickness of an etalon are separated from the main (Maine) pulse pair (Just). Here, pulse width is in the order of 1 picosecond, and only 2 - 3 picosecond separates from the Maine pulse, and the satellite pulse exists. Therefore, the RMS timing jitter was measured with the  $\Delta T = 5$  picosecond with the deflection of the timing by the situation to  $\pm 20$  picosecond. The data of a timing jitter are shown in drawing 7, and each data point expresses the relative time lag during the scan of each laser 210,220 with a rate [ of a scan ] of 106Hz in this drawing. This measured jitter has illustrated how the information on timing is acquired by the precision in spite of the jitter of only this while having illustrated the limitation of the precision of the electronic PLL circuit of a ballast choke 130. If a scan is performed quickly enough, the relative timing jitter within a scan time can be made very small. And if a stable timing pulse train is acquired by letting a laser pulse pass to an etalon, for example, even the jitter between scan times can be known to accuracy. Thus, though the jitter of several pico second is in laser, a scan characteristic becomes clear in the precision of a sub picosecond.

[0042] The use of two or more laser packed together (KO packaging) is serious. In the dual laser system which is not nice, it is independently pumped up on the pedestal (breadboard) from which the laser of the same couple differs, and the pumping was carried out by different laser just because it was assembled by this invention person before. Even if it used a ballast choke, before the mismatch of mold cavity length exceeded 40 microns of the successive range of PZT, it was about only 30 minutes that the slave laser was following in footsteps of master laser. At this (a mismatch exceeds 40 microns) event, imitation (tracking) became impossible. So, even if it is under a normal room temperature, the drift of the mismatch of the mold cavity length between the couples of 5MHz laser has exceeded easily 40 Miquelon which is the movable range of a great portion of PZT.

[0043] Symmetrically, since this can follow indefinitely the system packed together [ this invention ], it shows that the mismatch of mold cavity length has stopped splendidly in the

40-micron limit by PZT under a normal indoor condition. According to measurement of the absolute value of a frequency drift, and measurement of a relative value, about [ of the absolute drift of one laser ]  $1/7$  understands that the relative frequency drift between two laser 210,220 is small. A relative drift is on a fabrication and can improve still smaller by making two laser very identically. This can be attained by being because the termination of both the laser 210,220 being formed with the same PZT-FRM assembly, or forming the termination of both the laser 210,220 with the same FRM package, and changing the mold cavity length of the slave laser 220 by the fiber stretcher.

[0044] In order to reduce further both a relative timing drift and an absolute timing drift, it is good to muffle the fiber spool 280 and other components, and to constitute two laser in the same container. If it carries out like this, it will be muffled and temperature will also be controlled. The relative timing jitter reached even boundary wavelength the place got blocked using all the above-mentioned all directions methods (H.A.Haus and A.Mecozzi and "Noise of mode-locked lasers" IEEE J.Quantum Electron, QE-29, pp.983-996, and March 0993). By operating a mode locked laser near the wavelength of distributed zero, a jitter is reduced further and it will deal in it, since the timing jitter by boundary wavelength increases with buildup of distribution (DISUPASHON).

[0045] By disturbing the end mirror of a mode locked laser, induction of the fluctuation of the amplitude in scan frequency is carried out because of the misalignment of a mirror, and a focus blank. An operation of misalignment is minimized by using the tripartite mirror scan PZT so that alignment may be maintained, although it can do with a commercial Fabry-Perot interferometer by making a focus connect to a PZT mirror again so that the sensibility of an include angle may be reduced. The effect of a focus blank may be generated when so small that the scan amplitude is permissible to the confocal parameter of the beam useless incidence (beam way strike incident) of a PZT mirror. In a fiber laser, this focus blank causes fluctuation of power for reduction of the interference effectiveness (coupling EFESHI en C) of the beam which returns in a fiber a lifting and shortly. So, the depth of focus of a PZT mirror being shallow (tightness focusing) is are not desirable. The effect of this focus blank can be reduced by wise selection of the collimation (collimation) of a beam. For example, if PZT with a 40-micron scanning zone is used, a confocal parameter will be required for at least 2-3mm. Then, ZR it is quite small that the amount of  $2(\Delta L/ZR)$  is  $10^{-4}$  about noting that it is the confocal parameter of the beam way strike in a PZT mirror. If this amount is small, the amplitude modulation of laser is small in connection with this.

[0046] Even if it even if brings some fluctuation to the amplitude which the slight misalignment of a mirror is scanning, the waveguide property (guy DINGU property) of a fiber, therefore stability of beam directivity (pointing) are not \*\*\*\*\* (ed) rather. However, if there is no line crack of measurement so that generating of the deflection of an output beam may be prevented when a solid-state mode locked laser is used, the deflection of some output beams may arise.



[0047] As the strange gastalt's laser system, the termination of both laser may be formed by the same FRM, and mold cavity length is adjusted by the PZT fiber stretcher. Such a piezo ceramic-tube actuator (PIT 40x18x1) is manufactured by piezo mechanic incorporated company in Germany.

[0048] Even if the [timing calibration] PLL circuit stabilizer 130 is stabilizing the average of a relative time lag, this location is the timing signal which only several pico second may be changed and so has the precision of a request of about 100 femtoseconds, and requires that it should be compensated that the trigger of the data acquisition unit 50 is carried out proper. Such a signal is acquired from the mutual-intervention machine which has adopted nonlinear optics mixing within nonlinear crystal like BBO. Such a thing is performed in the above-mentioned example, and is performed by the man of others like Kafka et al. Also when using a mirror shaker for scan-time delay, the indispensable thing is shown also in order for this kind of triggering to acquire high degree of accuracy in weight-and-measures measurement.

[0049] However, even if this is a requirement, it is not sufficient condition. According to measurement of a jitter, it is clear it not only to generate fluctuation of timing between scans, but to have produced it between single scans. That is, the rate Rscan of a scan not only changes between scans, but it changes even the inside of a scan cycle. So, it is indispensable "before" That actuation of a scan takes place rather than signal averaging. Therefore, it is required for there to be two timing pulses "at least" for every scan from correlator. One side is for triggering among these two timing pulses, and another side is for time scale information. performing this -- a pulse train with uniform (setting to both the amplitude and time amount) this invention -- un--- 1 -- it can be satisfied also with a pulse train [ like ] of a scan interval. If it does in this way, \*\*\*\*\* and timing information can be acquired at the scan interval in each of each scan cycle.

[0050] In the calibration of [generating of timing scale] time scale, an important key point is choosing optical means, as it is used for generating timing information. In a desirable example, as shown in drawing 8 (a) - (b), a pulse train is generable by reflecting a single pulse from the exquisite (FINESSE) Fabry-Perot (FP) etalon highly so that the train of many pulses may be generated uniformly in time. It is because this FP etalon is used as "being a plate grumblingly" and internal reflection of the pulse is repeatedly carried out within FP etalon (namely, etalon exquisite to altitude) in it. The resonance characteristic is used rather here and permeability is low rather.

[0051] The permeability is  $T=0.0004$  supposing it adopts FP etalon of  $R=98\%$  of reflection factor which consists of two mirrors as an example. From now on, this example is explained. As shown in drawing 8 (a), the transmitted pulse trains are a series of pulses separated by the pass time of FP etalon, became weaker according to the attenuation factor depending on a mirror loss and misalignment, and have started. That is, the transmitted pulse train is  $T2$  considering  $T$  as permeability on the front face of an etalon. It decreases according to a factor. Although pulse amplitude becomes weaker slowly for every round trip, there is uniformity in the transmitted

pulse train to some extent. The 1st pulse (and max) in a pulse train has become weaker in 1/2500 compared with the pulse which carries out incidence to FP etalon.

[0052] Drawing 9 and drawing 10 show signs that the pulse train transmitted through FP etalon whose spacing of a mirror a surface reflection factor is  $R=98\%$ , and is about 1mm, and which has an air gap actually declines slowly. Drawing 10 shows the plot of a single retreat scan (back ward scan) and the point corresponding to the termination of a scan which have 17 pulses on the extended time-axis. These data is obtained by \*\*\*(ing) FP etalon to one branch of the usual scan correlator which has only adopted the RITORO reflector attached on the voice coil (loudspeaker). Since the sinusoidal voltage was impressed to the loudspeaker, some time lags are scanned by the sine wave-method. With time spacing between pulses, as shown in drawing 11 (a), the scan characteristic of a shaker mirror is obtained. The total scanning zone (total scan range) is computed according to the following several 11 from these data.

[0053]

[Equation 11]  $T_{max} = -(17 \text{ pulses}) \times (6.7 \text{ picoseconds / pulse})$

As the data shown in drawing 11 (a) was expected, the scan characteristic shows that it is not linearity to accuracy. In order to show the deflection from linearity, fitting of this data was carried out in a straight line, and this data was subtracted from this best fit (straight line). As shown in drawing 11 (b), a time amount scan characteristic has the deflection from linearity for the result.

[0054] The reflected pulse train is the same as the transmitted pulse train except decreasing by the prompt pulse which is the first surface echo and contains the great portion of pulse energy (namely, 98%), as shown in drawing 8 (b). Since the pulse reflected in this beginning occupies strong [ the great portion of ], it is convenient to perform what kind of experimental application and measurement. The reinforcement of this prompt pulse should care about that it is 2500 times the reinforcement of the pulse train which continues immediately after a prompt pulse. In almost all cases, this weak pulse train does not influence measurement. However, it can still be hard to accept.

[0055] Of course, although the low etalon of exquisiteness can also be used, attenuation of the pulse train which will be transmitted if it does so will become rapid more all the time, and the dynamic range of this correlator will become a limited element. For example, a surface reflection factor's activity of the etalon which is  $R=30\%$  generates a series of pulses which each pulse becomes weak  $1/10$ , and decreases rapidly rather than the last pulse. So, since it is the dynamic range of triple figures in one-time measurement in almost all data acquisition equipment, only about only three pulses can be used for the calibration of real time. This was the case of the correlation shown in drawing 5 -7. for example, by the dynamic range compression scheme of using logarithmic amplifier, until clearance of this effect can be carried out to some extent.

[0056] The combination of FP etalon can be used in the still more nearly another example. for example, according to the thin (it is (like a cover slip)) etalon, the pair of the pulse ( $\sim 1$  picosecond) which approached extremely is generated — it can make — this — more — spacing

-- being large (for example, 20 picoseconds) -- it can send to FP exquisite to altitude -- I will come out. Consequently, the pulse pair of every 20 picoseconds of a series of will be obtained. Thereby, the local and derivative information about timing characteristics is acquired.

[0057] A solid (solid) or a space mold (air SUPESUDO) is also available for the above-mentioned FP etalon. Although a solid etalon is more uneven and it is compact, an air SUPESUDO etalon can be adjusted and can avoid the breadth of a pulse. Here, the breadth of a pulse is a phenomenon which happens to the pulse which penetrated the etalon and has carried out many round trips. In order to acquire high degree of accuracy, it is required to control the temperature of an etalon. For example, a functional change of the group delay (group delay) which penetrates the piece of a \*\*\*\*\* silica and happens is  $\Delta t / \Delta T \sim 10^{-6}$  degree C in approximation. So, when the precision of 1 micron (6 femtoseconds)-is required in the range with an overall length of 1m (8 nanoseconds), temperature of an etalon should be made fixed within 1 degree C. There is an advantage in an air SUPESUDO etalon at the point which can be constituted using a temperature-compensation anchoring technique. Therefore, the temperature sensitivity of a solid etalon may be able to be reduced and it may be unnecessary in temperature control to actuation at a normal room temperature.

[0058] In addition, as shown in drawing 12 (a), some which use a series of fiber grids 310 from which the rate of a light reflex formed on the optical fiber 300 differs are one of those can be carried out. These grids 310 can be manufactured so that a pulse sequence may be also uniformly expressed also to Mr. un-1. In this case, although spacing (spacing) is uniform, that amplitude is un-uniform so that the scale "regular (ruler)" which a big pulse produces every every five pulses and 10 pulses as shown in this drawing may be formed. Of course, the fiber grid's 310 being formed in a desired location anywhere, if it is in a fiber 300 will be were rich in versatility very, and it will be advantageous to arrange a grid 310 in Mr. un-1, when removing the ambiguity of timing.

[0059] Moreover, if it is made for a pulse to want to pass the true length of a fiber 300, a pulse will spread by group-velocity distribution (GVD) within a fiber 300. Then, the chirp grid 310 may be formed in a way with which GVD of the fiber 300 which should be passed is compensated proper. Since there is only about 2 merem of no reflective bandwidth, if it is going to become instability to the pulse of a sub picosecond and is going to obtain the time resolution of high degree of accuracy, a chirp grid is required of the grid which does not have a normal chirp actually. The full-width-at-half-maximum (FWHM) bandwidth of a 100-femtosecond pulse with a central wavelength of 800nm is 8nm. And on the wavelength of 1500nm, bandwidth is about 30nm. To these pulses, only the chirp grid fully has wide band width of face.

[0060] It is known that those pulse itself has spread and the chirp of the reflective pulse of the femtosecond from a chirp grid is carried out. In this case, as an outline is shown in drawing 12 (b), it is required for the direction of a chirp to reflect continuously the pulse from two chirp grids 320,330 of reverse mutually. Here, a pulse is the chirp grid sequence CFGS first. Amplification

(broadcloth NINGU) of a pulse is prevented by using the compensation scheme of it being reflected from 320 and reflected from the almost same chirp grid 310 by which the chirp was continuously carried out to the reverse sense, the same result is obtained even if it makes this sequence into reverse, and reflected in the degree of CFG in order of CFGS namely.. Polarization beam splitter PBS By 340, it is the quarter-wave length plate QWP again. Effective division (splitting) and an effective echo are brought about by 350.

[0061] This technique was applied to chirp pulse magnification within the fiber by GARUBANASU dregs etc., and has stored a success (A.Galvanauskas, M.E.Fermann, K.Sugden, and Bennion, and "All-fiber femtosecond pulse amplification circuit using chirped Bragg gratings." Appl.Phys.Lett., 66, pp.1053-5, Feb.27, and 1995). However, the object in this standpoint of this invention differs from them, such as gal BANAKASU. In their research, in order to extend a light pulse to the very long persistence time (>300 picosecond) for chirp pulse magnification, and in order to compress the pulse again, the grid of a couple is used. Since this invention of bandwidth ( $\sim 1\text{nm}$ ) is [ the grid by which a chirp is not carried out ] inadequate for supporting a short pulse, the chirp grid is used by the reason of since some needs of compensating GVD of a fiber to the pulse which crosses the true length of a fiber will arise. Here, there is no demand that it will extend a pulse since the object in this standpoint of this invention is generating the sequence of a short pulse.

[0062] Two fiber grids can be used also in order to form an usable fiber FP etalon in transparency and an echo. Or a passive optical-fiber loop formation may be used. Other structures where an echo can be caused have the inadequate junction to the optical fiber in a fiber, and a micro bend. In these cases, probably temperature control will be required, and the variation of a calibration of timing can be known beforehand and will be compensated mathematically.

[0063] If the pulse train is physically possible, it is generable also by a series of mirrors selectively reflected with the reflection factor and spacing of each mirror which were carefully chosen so that a desired pulse train might be acquired. The algorithm for calculating a mirror parameter required since a desired pulse train is produced from a single pulse is already developed (V.Narayan et al., "Design of multimirror structure for high-frequency bursts and codes of ultrashort pulses," IEEE J.Quantum Electron.QE-30, pp.1671-1680, and July 1994). In addition to this, the optical device which consists of a partial reflector which can be used also in order to generate a pulse train from a single pulse has many.

[0064] A pulse train programmable to arbitration is generable by letting a laser pulse pass to the pulse shaping distribution delay line (DDL). According to this, although much bigger flexibility than the above-mentioned approach is acquired, there is a limitation in respect of the greatest pulse separation which can be attained. The upper limitation is actually 100 - 200 picosecond about. If some also tend to enlarge pulse separation from this, big equipment will be physically needed and it will become expensive exorbitantly.

[0065] Wavelength will be for another most useful example on the laser of the low repeatability near 1550nm (30MHz or less) to pour in a pulse train into the playback soliton preservation ring

which consists of a fiber loop formation with a gain section (for example, fiber by which Er dope was carried out). The pulse train poured in into this ring will be acquired by various approaches including the approach explained here (for example, the Fabry-Perot etalon, a fiber grid, a pulse shaper, in addition to this). Since it is playback-like [ this loop formation ], it is required to regrow with dumping about each laser pulse. This will happen every 200 nanoseconds by 5MHz laser. Even if it is AO (acoustooptics target) and is EO (electro-optics target), it is attained by the commercial optical switch of a certain kind, and deals in damping and impregnation.

[0066] However, another example will be for pouring two or more short pulses from single laser into the laser diode by which bias was carried out even a threshold (threshold level) or near the. Two or more facets of laser diode have 30% of reflection factor, and form FP etalon with low exquisiteness. However, the gain of this-laser diode will prevent thru/or prevent the "ringdown" of a light pulse. Thus, it will become possible to acquire the pulse train which consists of dozens of pulses. Group-velocity distribution in this diode and narrowing (gain narrow INGU) of gain will extend the pulse which carries out many round trips through that structure, and, so, will restrict the number of usable pulses actually. This device is applicable to an echo and transparency.

[0067] Specially, a fine calibration (submicron) inserts a birefringence crystal (for example, Xtal) into one team of the instrumentation system, and can make it by comparing the arrival time of the pulse spread in accordance with \*\*\*\* and the abnormality shaft of the crystal. In 1mm typical board thickness, the retardation for 2-3 waves is produced, and if the pulse of the persistence time of 100 or less femtoseconds is used by the retardation, the difference accepted easily will be produced.

[0068] [Synchronous detector optical system] A certain kind of nonlinear element can be used for the pulse signal train generated by the above-mentioned approach, and it can take an another laser pulse and an another cross-correlation. In order to detect the synchronia and the relative pulse timing of a pulse, various kinds of nonlinear processes can be used. As usable nonlinearity of a certain kind, although there are secondary harmony generating (SHG), the total sum frequency generating, gain saturation, absorption saturation, 4 wave mixing, and a photocurrent, it is not limited to these. There is an SHG crystal as selection which is likely to have a nonlinear element. However, only when an SHG crystal is used, and overlap is between laser pulses, there is demerit in which a signal does not occur. So, this can be used only as a detector of synchronia. By such a reason, it is necessary to use the various kinds of the above-mentioned pulse train generator, a pulse shaper, an etalon, and others. In a certain situation, a very high precision acquired by the activity of an SHG crystal does not have the need. In a certain case, the more desirable thing has also used the element with which the information about a time lag is acquired through "amplitude" information because with the response at the time of non-\*. There are many devices relayed in a saturation operation like a device with suitable traveling wave laser diode amplifier (TWAs), saturation absorber, photodetector, etc., an ingredient or a PIN photodiode, an avalanche photo-diode, or a SEED device. For example, TWA etc. has been used

for recovery of an optical clock in optical communication. If these (TWA) are fully driven to a saturation state, they will become comparatively insensitive at fluctuation of the amplitude. Here, the precision and range are decided by the recovery time (recovery time) of the device. It turns out that measurement can do a TWA device in the phase precision to about ten - three radians. In such a photoelectron device, only the nonlinearity of optical absorption is not the only method of bringing about timing information. Pulse timing information is acquired also by observing electric properties, such as a photocurrent of the device which changes as the pulse spreads through the device, and an electrical potential difference, electric capacity. In detecting change of an optical property, this is big simplification.

[0069] the laser scan system described here although these timing calibration techniques were used with the rapid-scanning laser method -- \*\*\*\* -- it does not restrict but it is expected that it is applicable even to free scan laser, a duplex wavelength mode locked laser, and the usual scan system that has adopted physical delay. As the example, there is calibration data shown in drawing 9 -11. This data was acquired from the scan system which consists of a RITORO reflector attached on the voice coil (loudspeaker). Since the sinusoidal voltage was impressed to the loudspeaker, some of the time lag was scanned at the sine wave-tune. The scan characteristic shown in drawing 11 (a) is applicable to correction of the time scale of any data acquired during the scan. If the actuator drives with the bigger amplitude, the scan characteristic will produce deflection clearly in sine wave. This is also correctable. It has a nonlinear scan characteristic correctable by the timing method of this invention explained here with other revolving devices, such as a glass block and a revolution mirror, again.

[0070] [Laser stabilization] Since the error of any mold cavity length is accumulated in a constant for every round trip of a laser mold cavity, even if it is fluctuation of very small mold cavity length, a big timing error may be produced. So, a servo loop is used and it is "time average" repeatability  $\mu 1$  Or although it is equivalent, it is necessary to hold "time average" mold cavity length mismatch delta L to zero. As shown in drawing 13, the feedback signal used in order to control an average mold cavity mismatch is detected by photodetector PD-1 of a couple, and PD-2, and is introduced into the usual phase-locked loop (PLL) circuit. As explained above, it turns out that the precision of such a PLL stabilization system is already measured, and two fiber lasers can be synchronized with RMS of less than five picoseconds by the maximum timing migration to 20 picoseconds. There is no precision of the stabilization quoted here what is based on a current technical level and shows the absolute limitation which can be attained. It is \*\*\*\* which can raise precision to less than one picosecond intrinsically. however -- if the time resolution of the request which becomes 1 or less femtosecond depending on the case is reached -- \*\*\*\*\* -- it is not expected. The timing proofreading method explained for this reason here is still required.

[0071] The detailed mimetic diagram of the laser stabilization oscillation system which contains a stabilizer 130 in drawing 13 as a desirable example is shown. A stabilizer 130 is timing

discrimination equipment TD. 131,132, a phase detector 133, a filter 134, the direct-current-voltage generator 135, amplifier 136, the frequency generator 140, and the adder 137 are included. Pulse amplifier (PA) 430,440 receives the electric pulse output from photodetector PD-1 and PD-2, respectively. Pulse amplifier 430,440 amplifies these received electric pulses, and is timing discrimination equipment TD. It outputs to 131,132, respectively. Timing discrimination equipment TD 131,132 prepares the signal, before the signal is inputted into a phase detector 133. Here, the commercial PZT control unit is used for the PZT control unit 450. High-tension amplifier incorporates the input signal of the range of 1-10V, and generates the output of the range of 0-150V proportional to this. Although the PZT control unit 450 is illustrated as another unit, it can also unify in a stabilizer 130 and it is more desirable.

[0072] In this desirable example of a stabilizer 130, the phase detector 133 for PLL is good at standard RF phase detector and a mixer (mixer) like an XOR gate with high linearity. Linearity is dramatically important also when it is going to scan what kind of subinterval of round-Trip Time. Or a time amount amplitude converter (TAC) may be used as a phase detector 133. Probably this also has very high linearity and will be suitable especially in the low repeatability of 5 etc.MHz etc. One limitation of phase stability precise to altitude is conversion (conversion) to FM which may happen in simple RF mixer from AM. That is, fluctuation of the amplitude of laser will be changed into fluctuation of timing by this mixer. So, it is desirable to perform signal conditioning (signal conditioning) to the electric pulse generated by optical diode PD-1 and PD-2. If it carries out like this, as shown in drawing 13, the timing discrimination equipment 131,132 in front of a phase detector 133 can perform most easily. However, this effect may be minimized also by reducing the amplitude noise of laser. It is known that an optical limit process will happen to an output port with laser between the mode locking actuation under a certain conditions. Thereby, when a ballast choke 130 operates, a timing jitter can be reduced substantially.

[0073] It is important that scan frequency is also larger than the bandwidth of a stabilization system. For this reason, although PLL maintains a mean-time location proper, the applied mirror scan is not blocked. The above-mentioned twin fiber laser was stabilized using the PLL circuit with a bandwidth of only 30Hz. There is an advantage that the range of the rate of a scan can be set up in the range until it results [ from 30Hz ] in several kHz in this, fairly lower bandwidth. In order to continue maintaining a synchronization in the precision of less than ten picoseconds, using the bandwidth of a 30Hz stabilizer, the relative timing jitter of the proper of the laser of a couple must be very low. This is attained using the approach of a configuration of having explained above. It ensures putting two laser on the environmental condition with the approach same in the biggest possible range.

[0074] It is also possible to generate a feedback signal required for stabilization with simple correlator. While laser is scanning, the peak location measured by correlator can also be used as an error signal fed back to a ballast choke 130. Since laser is scanning constantly in this invention, please care about that the technique of the simple static synchronous detector of

Dykaar et al. does not go well here.

[0075] The rapid-scanning system of this invention won the scan physics delay usual at many points, and free scan laser. Also when the big delay for several nanoseconds especially arises in a scan unlike the usual scan physics delay with a movable arm (Moe Ving arm), in this invention, neither misalignment nor a focus blank happens to a laser beam. In physical delay, alignment must be performed very carefully, and a confocal parameter must be larger than 1m also to the delay line for 1 nanosecond. Moreover, according to this invention, the rapid-scanning rate also exceeding acoustic velocity is possible. However, in physical delay, even the scan for 1 nanosecond (100 foot per second) is doubtful at 100Hz. But according to this invention, a scan in the range until it can carry out a big (it can adjust) scanning zone, for example, continues [ from about 50 picoseconds ] till 200 nanoseconds in the fiber laser which is 5MHz is possible. Probably, the 200 feet delay line will be required in order to attain such a scanning zone by the usual scan system. Moreover, it is not necessary to adopt the laser of high repeatability like the usual free scan system for a better duty factor (duty cycle).

[0076] Furthermore, a big time dynamic range is possible, and this is useful when carrying out a scan and OTDR of the target which separated. For example, with the time resolution of less than 1 femtosecond, if the total scanning zone is  $TR = 200$  nanosecond, it is 108. A time amount dynamic range is obtained. Moreover, unlike the usual free scan system, the duty factor it is decreasing in the dead time substantially and improved is attained. Further now, according to this invention, the design of a very simple and compact synchronous detector is that of \*\*, without needing no moving parts. For example, this correlator can also be made into the size of Game Boy (trade name). Moreover, by this invention, since the die length of a stroke does not need to match, the setup of an experiment becomes very simple.

[0077] The above-mentioned rapid scanning and the approach of a calibration can be used in order to conduct various measurement and experiments. Application of 2-3 which can use the approach and equipment of this invention is explained below. However, if it is this contractor, he can apply this invention to many application, and it will be able to understand easily that it is not what is limited to the application explained below.

[0078] Drawing 14 shows the desirable example of the common instrumentation system which has adopted the timing calibration approach by this invention which is using FP etalon, and rapid-scanning laser system. Incidence of the laser 510 (it is unquestioned whether laser 510 is master laser or it is slave laser) is carried out to FP etalon. The pulse train discharged by passing FP etalon is sent to the timing unit 540, and a series of data (data stream) which gives the time scale which the single pulse and cross-correlation from laser 520 were taken, and was proofread generates it. The pulse train reflected from the above-mentioned etalon is sent to a measurement unit (figure abbreviation) along with the single pulse from laser 520, the data of the up Norikazu ream from this measurement unit is inputted into "Y channels" of the data acquisition system (DAQ) 550 — having — the data of a single string of the timing unit 540 on



the other hand — DAQ It is inputted into "X channel" of 550. There are two applications from which a degree differs in this information.

[0078] 1. Time-of-flight scale correction : with this technique, a timing pulse forms a time scale. For example, supposing a sinusoidal scan is used, even if it is a uniform pulse sequence, non-uniformity is expressed in time amount. This time scale information could be used in order for the exact time scale before signal averaging to adjust scan data proper (using interpolation), if it is a high speed processor.

[0080] In other words, each scanning point is corrected by the high speed processor based on the time scale formed of the timing pulse. For example, drawing 11 (a) shows the scan characteristic to each peak of the scan shown in drawing 10 , and drawing 11 (b) shows the deflection from the linearity of these points. This time scale information is used for correction of this deflection, and can correct each peak "under flight" intrinsically.

[0081] 2. Abatement of a scan (wise triggering) : "the scan selector (scanning selector)" which looks for many timing pulses (at least two) which happen within the predetermined time amount slot relatively defined as the trigger pulse well is used for this technique. This selector determines whether total the scan data included in a signal-averaging machine (a go / no go). If the timing pulse from correlator fits into this time amount slot, a scan will be totaled to a current data buffer. Conversely, the scan is eliminated when a timing pulse "makes a mistake" in the time amount slot. After equalization of a signal ends, any nonlinearity of a time scale can be compensated proper.

[0082] Many scans will become useless although this wise triggering method is the simplest for carrying out. During a flight, scale correction is refined more, and although it is more efficient if it says from the futility of a scan, a count load is larger. Therefore, it will be decided which technique the limit by application uses.

[Surface instrumentation system] As an example of still clearer application, as shown in drawing 15 and drawing 16 , there are two examples with the desirable surface instrumentation system which has adopted the high-speed laser scan technique of this invention instead of the usual \*\* Miller process.

[0083] Drawing 15 shows one example of a surface instrumentation system. In this example, incidence of the beam from the slave laser 620 is carried out to FP etalon which generates the pulse train inputted into the timing unit 641. The beam from the master laser 610 is the ordinary beam splitter BS. It is divided by 660. One side of a beam by which the slave laser 620 was divided is inputted into the timing unit 641. Another side of this beam is turned to the front face inspected, and is reflected on this front face. The reflected beam is inputted into correlator 640. Similarly, the single pulse reflected from FP etalon is also inputted into correlator 640. Therefore, correlator 640 is used for the object (test piece) which should be measured, and the timing unit 641 is used for a time scale calibration. The data stream corresponding to the object which is an output from correlator 640 is inputted into Y channels of DAQ650. And the data stream

outputted from the timing unit 641 which contains correlator again is inputted into X channel of DAQ850. The timing unit data inputted into X channel brings about a time scale. And the distance information on the front face of an object is acquired from the data which was outputted from correlator 640 and inputted into Y channels.

[0084] Drawing 16 shows another example of the surface instrumentation system which has adopted two or more techniques of this invention. In this example, the timing device (FP etalon) is inserted in the beam path to an object. The beam reflected from FP etalon irradiates the object which should be measured. It is condensed with a lens L1 and light scattered about from an object front face is recombined with the pulse train [ finishing / a calibration ] which passed FP etalon (minding a beam splitter BS 670). The distance information (single pulse) to the object on which two or more pulse timing scale from this etalon was overlapped is acquired from the cross-correlation acquired as a result between the pulse trains from the gating pulse, object, and etalon from the slave laser 620. It is a single data stream and both the distance information to an object and a time scale calibration are included in this by this result. If it strokes, the distance to one on an object front face will be presumed by measuring the relative time lag between the timing pulse in a data stream, and an object pulse. the difference for which this comparison between an object pulse and an etalon pulse used the ultrashort pulse — it is the complete-change form of mensuration.

[0085] In drawing 15 and drawing 16, FP etalon is illustrated, as countered by the acute angle to an input beam. This incident angle is exaggerated in order to make it clear. If FP etalon is leaned from vertical incidence, as shown in drawing 8 (a), it will turn out that the amount from which a series of reflected lights of this etalon shift horizontally increases at this contractor. Therefore, the thing which can realize an incident angle and for which it restricts, it is made small and FP etalon is used is desirable. If a polarizer and Faraday rotator are in front of FP etalon, an activity on a vertical-incidence square is also possible. This spatial gap does not spoil the engine performance of this correlator, unless the lens and other openings of correlator 640,740 are overflowed.

[0086] Or the effect of this strike slip changes the form of the envelope of a pulse train where rapid degradation is something different, and may produce a certain advantage. such a thing — the scene of a beam — minding — or it may happen by the selectable nature of the include angle of the phase matching conditions of the nonlinear mixing crystal in correlator — I will come out.

[OTDR system] drawing 17 is the mimetic diagram of the optical time domain reflectometer (OTDR) system which has adopted the rapid-scanning laser and the timing system of this invention. As for scan laser system, it is desirable to consist of laser (nu to five to 10 MHz) of low repeatability so that the usable clear range may become large. The short pulse from the master laser 710 is a beam splitter BS. It is divided into two beams by 760. One side is sent to the timing unit 741 among the divided beams, and another side is sent to the waveguide sample offering devices (DUT) 790, such as a fiber. The pulse reflected from the front face in DUT790, a

connection, a defect, etc. is sent to correlator 740 for measurement of precise timing with a precision of about 10 femtoseconds, i.e., about 3 microns, thru/or distance. This is realized by the following approaches.

[0087] That is, the single pulse from the slave laser 720 is divided into two beams. Among those beams, since one side is used as a gating pulse for the signal from a fiber, it is sent to correlator 740. The another side is sent to the pulse shaper 780 which generates the pulse sequence used with the timing unit 741 whose itself is another correlator next, in order to bring about the time scale proofread for the data acquisition (DAQ) unit 750. For the system of repeatability with low 5MHz (TR=200ns) extent, the pulse shaper 780 must generate the pulse sequence which fills the whole timing interval for 200 nanoseconds generally. The pulse shaper could consist of this desirable example using the chirp fiber Bragg grid as shown in drawing 12 (b).

[0088] As a deformation mode of this laser, a timing unit and correlator are usable. For example, the role of the master laser 710 and the role of the slave laser 720 are exchangeable. As a pulse shaper, a fiber FP etalon or (passivity or those with gain) fiber loop formation is usable.

[EO sampling oscilloscope] drawing 18 is the mimetic diagram of an electro-optics sampling oscilloscope without a jitter which used the rapid-scanning laser and the timing system of this invention. In this example, the non-contact EO sampling technique fully established is combined with the rapid-scanning technique explained here, and quite big flexibility is brought to adjustment of a time scale.

[0089] The pulse from the master laser 810 is divided into two beams. One beam is sent to the timing unit 841, and the pulse of another side is sent in order to generate an electric pulse on a sample offering device (DUT). In this case, the sample offering device is attached on the integrated circuit (IC) through the photoconduction (PC) switch 891. The pulse from the slave laser 820 is also divided into two beams. One beam is sent to the electro-optics (EO) probe chip 892, and the beam of another side is sent to the pulse shaper 880 which generates a pulse train. This pulse train is sent to the timing unit 841 next for the calibration of a time scale. The pulse to which it came on the contrary from EO probe chip 892 is modulated by interference between the electrical potential difference from DUT, and EO probe chip 892. These pulses are detected by the polarization optical element 893, and are sent to Y channels of DAQ850. Therefore, a precision timing calibration is obtained the same with having explained for ODR of drawing 17.

[0090] A time lag, a scan interval, and scan frequency can be set as a desired value with a stabilizer 830. For example, if you want to increase scan frequency to two times (not being a scanning zone), it is necessary to double the modulation frequency in the slave laser 820, and only a corresponding amount needs to increase the scan electrical potential difference of PZT. What is necessary is just to increase the scan electrical potential difference of PZT simply, in order to increase a scanning zone compared with it without changing scan frequency. The relative delay of the time amount sweep range (time sweep range) is adjusted by the phase control of a stabilizer 830. This flexibility of adjustment of a time scale is the same as that of

what is given by the time delay base of the usual oscilloscope.

[0091] Probably, it will be possible similarly to use a photoconductivity sampling for this object. Although much high sensibility will be obtained if it carries out like this, time resolution is restricted by about 2 picoseconds. The application of a short laser pulse and scan delay used most widely was pump probe measurement of physics, chemistry, or electronic system all the time. However, it is what is likely to happen at any moment that the application range for this technique spreads out quickly, and this technique becomes goods across a science commercial scene. The technique of rapid scanning explained here and a time amount calibration is usable to almost all application using a super-fast laser pulse. All are because adjustment of the time lag between laser pulses is needed in a certain format on the data of these application. These application can be applied widely, without being able to apply to the electro-optics trial of the charge dynamics property of a semiconductor material, and the ultra high-speed electron / photoelectron device in the field of a semiconductor device, all optical-signal-processing photoconduction samplings, time amount decomposition NANOMETA probing of various many ways, etc., and being limited to these.

[0092] Therefore, many new application for the terahertz beam to which these scan methods containing terahertz IMAGING are applicable is under development. As the example, there are some which are indicated with reference (B.B.Hu et al., "Imaging with Terahertz Waves", OpticLetters, Vol.20, No.16, August 15, 1995, pp.1716-1719), such as Huu. Recently, a ultra high-speed photodetector comes to be marketed and the speed (50GHz, 10ps FWHM) exceeds far the measurement capacity of a commercial oscilloscope (for example, Newport Corp.Model #PX-D7 made from Picometrix). Picosecond laser and scan delay are required in order to pull out the advantage of the speed of these detectors to the maximum extent. The scan method of this invention is moreover still more suitable for especially remote probe FAULTING of the laser radar of the resolution of superiority with extraordinary selection of the scanning zone, therefore submillimeter meter, and an object. According to the flexibility of the scanning zone adjustment, a rapid-scanning system can be made parallelism with the good adjustment hourly base of an oscilloscope.

[0093] According to the very high rate of a scan which can be attained by the rapid-scanning approach explained here, operation of much potential new application can be enabled. A scan speed parameter (one to table 3 reference) is the symbol of the advantage which has utility value specially. The scan speed of tables 1-3 should care about that the range has attained to even 30,000 m/s from 3 m/s. So, also with a free scan technique or a rapid-scanning technique, since the supersonic scan speed is possible, this invention has utility value potentially by research and application of the sound effect in the solid-state by which induction is carried out, for example to laser, and a liquid, a photoelastic effect, etc. It is not practical to use the usual scan method in such application. It is because it is required in the usual scan method to move a scan mirror at acoustic velocity in a physical delay system and it is unreal.

[0094] Although this invention has been explained with reference to a desirable example, application is not limited to these examples. It is clear to this contractor that there are the deformation mode and variation of others to this invention from the above disclosure and instigation. Therefore, although the examples of this invention which took up here and has been explained are some those mere, it is clear for many deformation to be possible on it in addition, without separating from the thought and the judgment of this invention.

---

[Translation done.]

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 07-183597

(43)Date of publication of application : 21.07.1995

(51)Int.Cl.

H01S 3/094  
G02B 6/00  
G02F 1/35  
H01S 3/07  
H01S 3/10

(21)Application number : 05-323870

(71)Applicant : SHIN ETSU CHEM CO LTD

(22)Date of filing : 22.12.1993

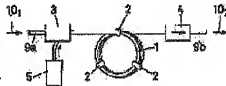
(72)Inventor : KAMIYA KAZUO  
TAKANO SHINICHI

## (54) OPTICAL FIBER LOOP FOR EXCITATION OF OPTICAL AMPLIFIER

## (57)Abstract:

PURPOSE: To obtain an optical fiber loop for excitation of an optical amplifier which causes very little a microbending loss or a loss depending on a polarized light.

CONSTITUTION: In an optical amplifier amplifying a signal light 101 by a stimulated emission light obtained by making the signal light 101 and an excitation light enter an optical fiber 1 for excitation doped with a rare-earth element, an optical fiber loop for excitation is constructed in such a manner that the optical fiber 1 for excitation is wound in the shape of a loop in a free space, so as to form a bundle, and a part or the whole of the loop is bonded by a bonding agent 2 so that the bundle be fixed. Since the center of the optical fiber loop for excitation is located in the free space not containing a support such as a bobbin, no lateral pressure is applied to the optical fiber loop 1. By using this optical fiber loop for excitation, therefore, the optical amplifier which is free from a change in the state of a polarized light, causes very little a loss depending on the polarized light and has a stable amplification factor can be constructed.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

23.10.1997

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

20.06.2000

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of 2000-11059  
rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's 19.07.2000  
decision of rejection]

[Date of extinction of right]

# DETAILED DESCRIPTION

---

## [Detailed Description of the Invention]

[0001]

[Industrial Application] This invention relates to the optical fiber loop formation for excitation of the light amplifier used in the field of optical communication.

[0002]

[Description of the Prior Art] In the optical transmission system, after magnification of the lightwave signal decreased by long-distance transmission once changes a lightwave signal into an electrical signal conventionally and carries out electric magnification, the approach of changing into a lightwave signal again is enforced. However, by such approach, in there being a limit, there is a problem that a system becomes complicated in the junction of the high capacity communication asked for rapidity. Recently, the light amplifier which can amplify a direct lightwave signal is being used, without changing optical communication into an electrical signal. An active element is excited with the excitation light by which incidence was carried out to the optical fiber for excitation which doped rare earth elements, such as an erbium, in the core section, and a light amplifier amplifies directly the signal light which passes through that by the induced emission.

[0003] The light amplifier which used the optical fiber for excitation which doped the erbium as an active element fits the optical amplification for 1.55-micrometer band optical communication, and is already being put in practical use. Moreover, about the optical amplification for 1.30-micrometer band optical communication, the optical fiber for excitation which doped neodymium and PURASEOJILUMU attracts attention.

[0004] There is an optical isolator for removing the reflected light of the optical multiplexing machine for carrying out incidence of the power circuit, and the excitation light and signal light from the excitation light source for driving the excitation light source for exciting the active element other than the optical fiber for excitation and the excitation light source as a main component part of a light amplifier to the optical fiber for excitation, excitation light, or signal light etc. As a direction of incidence of the excitation light to the optical fiber for excitation, there are front excitation excited from the incidence side to the rare-earth-elements dope optical fiber of signal light, back excitation excited from an outgoing radiation side, and bidirectional excitation excited from an incidence and outgoing radiation side, and it can respond like an activity eye of a light amplifier, respectively, and can use properly.

[0005] Die length differs and the optical fiber for excitation which doped the rare earth elements used for a light amplifier is variously adopted by the concentration and fiber structure of an active element in a core from the less than 10cm thing to the thing 200cm or more. In order to



make the whole light amplifier compact, the optical fiber for excitation is twisted around the reel.

[0006]

[Problem(s) to be Solved by the Invention] When it generally bends in a small path, the transmission loss called macro bending loss generates the optical fiber of a single mode. Transmission loss becomes large, so that a bending diameter is so small that curvature is large. Since the rare-earth-elements dope optical fiber used as an optical fiber for excitation of a light amplifier is an optical fiber of a single mode, it has a limit that the diameter of bending is not made to below constant value. Furthermore, recently, since changing signal luminous intensity is known and it becomes the cause of degradation of a transmission characteristic according to the polarization condition of the signal light which transmits an optical transmission system, it has been required that loss resulting from an optical device and the polarization dependency of a transmission line should be made small as much as possible.

[0007] Generally the optical fiber for excitation is twisted around the bobbin with a diameter of several cm or the reel. The threshold value in which a micro bending loss generates the path to twist with the optical fiber property of the diameter of mode FURUDO and cut-off wavelength of the optical fiber for excitation differs. Those elements are considered and it is usually twisted around reels made from plastics, such as polypropylene with a diameter of about 45mm or more and polyethylene. thus, a reel or a bobbin --- a volume --- the price --- \*\*\*\* --- excitation --- \*\* --- an optical fiber --- the loss depending on polarization was considered in the detail about the loop formation. Consequently, it was found out that it is one of the causes by which a lateral pressure is added from peripheral faces, such as a reel, to the loop formation of the optical fiber for excitation, an optical fiber produces distortion and this produces a polarization condition. Since this lateral pressure changes with temperature fluctuation, it will be twisted around a reel, and the loss which depends for an optical fiber on polarization will also be changed.

[0008] It was made in order that this invention might solve such a trouble, and it aims at offering the optical fiber loop formation for excitation of the very small light amplifier of a micro bending loss or a polarization dependence loss.

[0009]

[Means for Solving the Problem] The optical fiber loop formation for excitation of the light amplifier which applies this invention for attaining this object in the light amplifier which amplifies said signal light with the induced emission light which is made to carry out incidence of signal light and the excitation light to the optical fiber 1 for excitation which doped rare earth elements, and is obtained as shown in drawing 1 corresponding to an example Said optical fiber 1 for excitation is rolled in the shape of a loop formation in free space, a bundle is formed, a part or all of a loop formation pastes up with adhesives 2, and the bundle is being fixed.

[0010]

[Function] Since the bundle has fixed the optical fiber loop formation 1 for excitation of a light amplifier with adhesives 2 by the condition of having been wound in the shape of a loop formation,

without including base materials, such as a bobbin, at the core, a lateral pressure is not added from a core to the optical fiber loop formation 1. Therefore, the loss which fluctuation of a polarization condition does not have, either and is dependent on polarization can constitute a very small light amplifier.

[0011]

[Example] Hereafter, a drawing explains the example of the optical fiber loop formation for excitation of the light amplifier which applies this invention to a detail.

[0012] Drawing 1 is the side elevation of the whole used as the light amplifier using the optical fiber loop formation for excitation which is the example of this invention. It consists of this example as amplifier for carrying out optical amplification of the communication link light with a wavelength of 1.55 micrometers.

[0013] The optical fiber loop formation 1 for excitation of this example is manufactured as follows. The reel of the outer diameter of 60mm which attached the dismountable flange, and the product made from width-of-face Teflon of 8mm is prepared beforehand. After twisting the fiber which doped ERUBIYUUMU with a dia length of 80m to the quartz glass of a core as an optical fiber for excitation about 400 times in the condition that there is almost no tension in the reel, the ultraviolet curing mold silicone denaturation epoxy adhesive 2 is applied to a periphery, and ultraviolet rays were irradiated and were stiffened. After hardening, the flange of a reel was removed and the fiber was taken out in the state of the bundle. The acquired optical fiber loop formation 1 is pasted up with adhesives 2, and the bundle is being fixed. Fusion splicing of the end of the optical fiber loop formation 1 is carried out to the optical multiplexing machine 3, and an end is already connected to an optical isolator 4. The optical fiber connected with optical fiber 9a for a communication link and the excitation light source 5 is connected to the input side of the optical multiplexing machine 3. Optical fiber 9b for a communication link by the side of outgoing radiation is connected to the output of an optical isolator 4. Thus, a light amplifier is constituted by the optical fiber loop formation 1 for excitation.

[0014] It is the communication link light 101 with a wavelength of 1.55 micrometers with the light amplifier of the above-mentioned example shown in drawing 1. Incidence is carried out to optical fiber 9a for a communication link, incidence of the light with a wavelength of 1.48 micrometers is carried out from the excitation light source 5, and it is the outgoing radiation communication link light 102. Magnification gain was searched for by measuring reinforcement. Under the present circumstances, fluctuation of an output light according signal light to a polarization condition was measured with the actinometer 7 by the \*\*\*\* controller 6 (refer to drawing 2). Fluctuation of magnification gain was 0.1dB or less.

[0015] Furthermore, with the light amplifier of the above-mentioned example, the optical fiber loop formation 1 to which the bundle is being fixed with adhesives 2 was contained to the temperature adjustable thermostat 8, as shown in drawing 2, and the thermo-cycle trial at -40 degrees C - 85 degrees C was performed. Fluctuation of magnification gain was 0.5dB or less.

[0016] For the comparison, the light amplifier of the example of a comparison was made as an experiment using the optical fiber loop formation for excitation besides application of this invention as follows, and the engine performance was evaluated.

[0017] After twisting ERUBIYUUMU dope quartz glass fiber with a die length [ of the same property as the above-mentioned example ] of 80m about 400 times in the condition that there is almost no tension in the reel made from polypropylene with an outer diameter [ of 60mm ], and a width of face of 8mm, it considered as instead of [ of the optical fiber loop formation 1 for excitation which fixed only the end fiber to the reel and was used in the example ]. The light amplifier of the example of a comparison was constituted like the example except changing the optical fiber loop formation for excitation in this way.

[0018] Magnification gain was searched for for the light amplifier of the example of a comparison on the same conditions as the case of said example. Consequently, fluctuation of magnification gain was the same as the case of an example at 0.1dB or less. Furthermore, the optical fiber loop formation of the light amplifier of the example of a comparison was contained to the temperature adjustable thermostat 8, and the thermo-cycle trial was performed on the same conditions as the case of said example. It was 3.2dB, and fluctuation of the magnification gain of this example of a comparison was compared with fluctuation (0.5dB or less) of the magnification gain of said example, and was substantially bad.

[0019]

[Effect of the Invention] As mentioned above, as explained to the detail, since the optical fiber loop formation for excitation of the light amplifier of this invention is maintaining the shape of a loop formation in free space, it produces the loss which a lateral pressure is not added and originates in a polarization dependency, and does not have things. Therefore, the magnification property extremely stable [ the light amplifier's which used this optical fiber loop formation for excitation ] will be acquired.

---

[Translation done.]



【特許請求の範囲】

【請求項1】第1レーザ発生源からの第1レーザパルスと第2レーザ発生源からの第2レーザパルスとの間の時間差を検出する検出ステップと、

検出された該時間差に基づいて制御信号を発生させる制御信号発生ステップと、

該制御信号に基づいて該第2レーザ発生源の出力を連続的に調整し、該調整により該第1レーザパルスと該第2レーザパルスとの間の該時間差を制御する時間差制御ステップとを有し、

該第1レーザ発生源からの該第1レーザパルスと該第2レーザ発生源からの該第2レーザパルスとを比較する、

レーザパルス比較方法

【請求項2】第1短パルスレーザからの第1パルス出力と第2短パルスレーザからの第2パルス出力との間の時間差を検出する検出ステップと、

該検出ステップで検出された該時間差に基づいて時間遅れ制御信号を発生させる制御信号発生ステップと、  
該時間遅れ制御信号に基づいて該第2パルス出力の周期を変えることにより、該第2パルス出力の時間遅れを変更する時間遅れ変更ステップと、

該第1出力パルスおよび該第2出力パルスのうち一方の時間遅れを所定の仕方へ変更することにより、該時間遅れ変更ステップで変更された該第2パルス出力と該第1パルス出力とを走査する走査ステップとを有し、

該第1パルス出力および該第2パルス出力を急速に走査させる、

高速レーザ走査方法、

【請求項3】前記時間遅れ変更ステップは、前記第2短パルスレーザのレーザキャビティ長を変えることにより行われ、

前記走査ステップにおいて、前記第1短パルスレーザおよび該第2短パルスレーザのうち一方のレーザキャビティ長を変えることにより、前記時間遅れが調整される、

請求項2記載の高速レーザ走査方法、

【請求項4】前記第1短パルスレーザおよび前記第2短パルスレーザのうち一方のレーザキャビティ内に挿置されたビエゾ素子（ビエゾアクチュエータ）に、矩形波、方形波および正弦波のうちいずれかを印加することにより、

前記走査ステップにおいて、前記所定の仕方へ前記第1短パルスレーザおよび前記第2短パルスレーザのうち該一方の前記レーザキャビティ長が調整される、

請求項3記載の高速レーザ走査方法、

【請求項5】動揺信号を出力する信号発生器と、  
第1短パルスレーザおよび第2短パルスレーザのうち少なくとも一方のレーザキャビティ内に挿置されており、前記動揺信号に基づいてそのキャビティ長を

変更するキャビティ長変更ユニットとを有する、  
高速走査レーザ装置、

【請求項6】前記第1レーザからの第1パルス出力と前記第2レーザからの第2パルス出力との間のタイミング差に基づいて制御信号を発生させ、該制御信号および前記動揺信号に基づいて前記キャビティ長を変更するキャビティ長変更ユニットに該制御信号を出力する安定器を有する、

請求項5記載の高速走査レーザ装置、

【請求項7】前記安定器は、

前記第1短パルスレーザからの第1パルス出力と前記第2短パルスレーザからの第2パルス出力との間の位相差を検出して制御する位相ロックループ回路と、  
該位相ロックループ回路によって検出された該位相差に基づいて前記制御信号を発生させ、該制御信号を調整して出力する制御信号発生手段とを有する、

請求項6記載の高速走査レーザ装置、

【請求項8】前記キャビティ長変更ユニットは、ビエゾ素子（ビエゾアクチュエータ）上に取り付けられているミラーを有する、

請求項5記載の高速走査レーザ装置、

【請求項9】一つ以上の短パルスからなるレーザビームを出力するレーザ発生手段と、

該レーザ発生手段と協働して該レーザ発生手段の有効キャビティ長を変化させ、この変化により該レーザビームの反復率を変える可動デバイスとを有する、  
短パルスレーザ装置、

【請求項10】前記レーザ発生手段は終端部を有し、前記可動デバイスは、該レーザ発生手段の該終端部に設けられている、

請求項9記載の短パルスレーザ装置、

【請求項11】前記可動デバイス上に取り付けられているミラーを有し、

該可動デバイスは該ミラーを動かして、前記レーザ発生手段の前記有効キャビティ長を変化させ、この変化により前記レーザビームの前記反復率を変更する、  
請求項10記載の短パルスレーザ装置、

【請求項12】前記可動デバイスは、ビエゾ素子（ビエゾアクチュエータ）である、

請求項11記載の短パルスレーザ装置、

【請求項13】前記可動デバイスは、直径が可変なドラムであり、

前記レーザ発生手段は、該可動デバイスに巻き付けられているファイバーであって、

該可動デバイスの該直径の変化によって該レーザ発生手段の前記有効キャビティ長が変化し、この変化によって前記レーザビームの前記反復率が変更される、  
請求項9記載の短パルスレーザ装置、

【請求項14】前記レーザ発生手段として、前記ドラムに別のレーザ発生手段が巻き付けられている、

請求項13記載の短パルスレーザ装置。

【請求項15】前記可動デバイスは、ビエン電気ドラムである、

請求項14記載の短パルスレーザ装置。

【請求項16】第1パルスとしての高速短パルスからなるレーザビームを出力するレーザ発生手段と、該レーザ発生手段と協調して前記レーザ発生手段の前記有効キャビティ長を変化させこの変化によって該レーザビームの反復率を変更する可動デバイスとを有する第1短パルスレーザと、

第2パルスとしての第2短パルスを出力する第2短パルスレーザと、

該第2短パルスからパルス列を生成する光学要素と、該光学要素により発生した該パルス列と該第1パルスとの相関をとり、該パルス列に関して該第2パルスの較正を含んでいる較正信号を発生させるタイミングユニットと、

該第1パルスを供試目標物に出力し、該供試目標物による該第1パルスの反射に対応する反射パルスを受信する光学出力デバイスと、

該反射パルスと該第2パルスとの相関を取り、相関信号を出力する相関器と、

該相関信号を該較正信号と比較するデータ取得ユニットとを有する、

距離計測装置。

【請求項17】表面計測システムに採用されていて、

前記供試目標物は、表面であり、

前記光学出力デバイスは、該表面上に前記第1パルスの焦点を結ぶるレンズである、

請求項16記載の距離計測装置。

【請求項18】光学時間領域反射率計であって、

前記供試目標物は、光ファイバーであり、

前記反射は、該光ファイバー中の光学的不連続性からの該第1パルスの反射である、

請求項16記載の距離計測装置。

【請求項19】第1高速短パルスからなるレーザビームを出力するレーザ発生手段と、該レーザ発生手段と協調して前記レーザ発生手段の前記有効キャビティ長を変化させこの変化によって該レーザビームの反復率を変更する可動デバイスとを有する第1短パルスレーザと、

第2短パルスを出力する第2短パルスレーザと、

該第1パルスからパルス列を生成する光学要素と、該第1パルスを供試目標物に出力し、該供試目標物による該第1パルスの反射に対応する反射パルスを受信する光学出力デバイスと、

該反射パルスと該第2パルスとの相関、および該反射パルスと該光学要素により生成された該パルス列との相関を取り、該パルス列に重畳された該反射パルスと該第2パルスとの相関に対応している対応信号を出力する相関

器とを有する、

距離計測装置。

【請求項20】第1短パルスからなるレーザビームを出力するレーザ発生手段と、該レーザ発生手段と協調して該レーザ発生手段の有効キャビティ長を変化させこの変化によって該レーザビームの反復率を変化させる可動デバイスとを有する第1短パルスレーザと、

第2短パルスを出力する第2短パルスレーザと、

該第2パルスからパルス列を生成する光学要素と、該光学要素により生成された該パルス列と該第1パルスとの相関を取って相関信号を発生させ、該パルス列に関して該第2パルスの較正を指示する較正信号を出力するタイミングユニットと、

供試デバイスに該第1パルスを出力し、この出力によって該供試デバイス上に信号を発生させる光学出力デバイスと、

該供試デバイスの計測すべき一点に該第2パルスを出力し、該供試デバイス上に発生した該信号と該一点に出力された該第2パルスとの間の干渉によって改変された反射信号を受信するプロブと、

該相関信号と該反射信号とを比較し、この比較により高精度の時間ベースを供給するデータ取得ユニットとを有する、

電気光学サンプリング・オシロスコープ。

【請求項21】ファイバースプールに巻き付けられている光ファイバーからなる短パルスレーザを外環境から隔離する隔離ステップを有する、

短パルスレーザ安定制御方法。

【請求項22】前記ファイバースプールは、消音されている、

請求項21記載の短パルスレーザ安定制御方法。

【請求項23】前記ファイバースプールの熱膨張係数と前記光ファイバーの熱膨張係数とは、互いに一致している、

請求項21記載の短パルスレーザ安定制御方法。

【請求項24】前記短パルスレーザは、第1短パルスレーザとして的高速短パルスレーザであり、第2短パルスレーザの安定性は、該第1短パルスレーザの安定制御と共に制御され、

該第1短パルスレーザおよび該第2短パルスレーザは、いずれもファイバレーザであって、

該第1短パルスレーザおよび該第2短パルスレーザを同一の装置から同一の仕方で作成する構成ステップと、

該第1短パルスレーザおよび該第2短パルスレーザを共通のレーザでポンピングするポンピングステップと、

該第1短パルスレーザおよび該第2短パルスレーザを共通のファイバースプールに巻き付ける巻き付けステ

ップと、

該第1短パルスレーザーおよび該第2短パルスレーザーを単一の容器内に設置する設置ステップとを有する、請求項2記載の短パルスレーザー安定制御方法。

【請求項25】短パルスレーザーをゼロ分散波長付近で動作させることにより、タイミングジッターを量子限界にまで低減する、短パルスレーザー安定制御方法。

【請求項26】消音および温度制御のうち少なくとも一方が施されている容器中に短パルスレーザーを設置する設置ステップを有する、短パルスレーザー安定制御方法。

【請求項27】パルス出力としての超短パルスを出力するレーザーと、

該レーザーからの該パルス出力が入射すると、所期の時間だけ互いにパルスが離れているパルス列を生成する光学要素とを有する、

較正時間スケール発生装置。

【請求項28】前記光学要素は、

誘電体ミラーおよび光屈折性ファイバー格子のうち一方からなる終端反射器を持つ光ファイバー・キャビティ内に形成されている光学エタロンと、

光共振反射器と、

反射を生じるミスアライメント・スプライズをもつ光ファイバーと、

所定の反射率および間隔を持つファイバー格子が複数の光屈折率を生じている光ファイバーと、

所望の時間間隔で反射を生じるように複数のマイクロバンドが配設されている光ファイバーと、

反復パルスを生ずるように閾値付近にバイアスされていて、光パルス列の減衰を防止しないし阻止されている半導体レーザードiodeと、

反復パルスを生ずるように閾値付近でポンピングされている光ファイバー利得媒体を含む線形ファイバロー・キャビティと、

光スイッチ要素により注入され減衰させられ、一つ以上のパルスを保存する受動光ファイバーループと、

光スイッチ要素により注入され減衰させられ、一つ以上のパルスを保存する増幅光ファイバーループと、

異なるトランスバース・モード中を移動するパルスに、モード分散により異なる到着時刻が生じるマルチモード光ファイバーとのうちのいずれかである、

請求項27記載の較正時間スケール発生装置。

【請求項29】前記光学要素は、

第1方向へチャープしている複数の光屈折率チャープファイバー格子をもつ第1光ファイバーと、

本質的に該第1光ファイバーと同じであるが、第1方向とは反対方向の第2方向へチャープしている複数の光屈折率チャープファイバー格子をもつ第2光ファイバーと、

前記レーザーからの前記パルス出力を該第1光ファイバーおよび該第2光ファイバーのうち一方に向け、該一方からの第1の反射された複数のパルスを受光して、該第1の反射された複数のパルスを該第1光ファイバーおよび該第2光ファイバーのうち他方に向け、該他方からの第2の反射された複数のパルスを受光して、該第2の反射された複数のパルスを較正された時間スケールとして出力する手段とからなる、

パルス列発生器である、

請求項27記載の較正時間スケール発生装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、超短パルス幅レーザの技術分野に属し、特に極小（すなわちマイクロスケール）の機械的な動作を実行するための装置および方法の技術分野に属する。本発明はまた、高精度（すなわちサブピコ秒）のタイミング較正に使用できる方法に関し、同方法は前述の時間的走査方法に対しても在来の時間的走査方法に対しても適用可能である。分けても本発明は、コリレータやレンズ、三次元イメージング、コンタクト、トモグラフィおよび光時間領域レフレクトメトリ（OTDR）を含む他の形式のボン・アプローブデバイスにおいて、機械的な走査遅延アームの必要性をなくする。

【0002】

【従来の技術】超高速レーザオシilloscopeは、今のところ、反復率が5MHzから1GHz程度までの範囲で、ナノジュールレベルのパルスエネルギーで10fs（フェムト秒）のオーダーのパルス幅（のレーザ）を発生する能力があると知られている。この様な短パルスは、タイムゲーティングや度量衡学を含む多くの応用に使用されている。このような短光パルスの応用の多くにおいては、光パルスのワンセットが他の光パルスのワンセットに対して遅れていることが必要である。ここにおいては、時間遅れは非常に高精度であることが必要であり、例えば10fsのオーダーの精度であることが必要である。短パルスの時間遅れは、生物学的または医学的なイメージングや、高速光検出および光サンプリング、光時間領域反射率計、並びに度量衡学などの応用に、多く使用されている。光パルスの遅延および走査（スキミング）のための通常の方法は、光パルスを鏡から反射すると共に、この鏡を何らかの機械的手段で物理的に距離Dだけ動かすことである。距離Dは、遅延時間ΔTと、真空中では3.0×10<sup>8</sup> m/sの光速との積で定義される。すなわち、

$$D = c \cdot \Delta T \quad \text{または} \quad D(\text{cm}) = 15 \times \Delta T(\text{ns})$$

この種の遅延は、ここでは「物理的遅延」と呼ぶことにする。同様に、走査というのは、ここでは二つの光パルスの間の到着時刻の差のシステムティックな変動を指す

ものとする。鏡の精密な位置決めおよび走査のために、すでに様々な方法やデバイスが開発されている。例えば以下のようなものがある。

・ボイスコイル型デバイス(シューカー)(R. F. Forster and F. A. Beiser, APPL. Opt. 17, 3534(1978))

・回転鏡対(Z. A. Yaza and N. M. Amer, Opt. Com., 36, 406(1981))

・ステップモーターを採用しているリニアトランスレータ(多くのベンダーから商品化されている)

・ガルバノメーターを採用しているリニアトランスレータ(D. C. Edelstein, R. B. Ronney, and M. Schuermann, Rev. Sci. Instrum. 62, 579(1990))可調整群遅延(アジャスタブル・グループ・ディレイ)を使用している他のタイプの物理的遅延には、以下のようなものがある。

・定走ガルバノメーターを採用しているフェムト秒パルスシェーパ(FPS)(K. F. Kwong, D. Yankelevich, K. C. Chu, J. P. Heritage, and A. Denes, "400-Hz mechanical scanning optical delay line" Opt. Lett. 18, (7) 558(1993)(以下 Kwong et al. と略記); K. C. Chu, K. Liu, J. P. Heritage, A. Denes, Conference on Laser and Electro-Optics, USA Tech. Digest Series, Vol. 8, 1994, paper CTh123.)

・回転ガラスブロック

物理的遅延方法には数々の短所があるが、その最たるものは長い遅延が必要な場合には広い場所をとってしまうことである。例えば、10 ns(ナノ秒)の遅延を得るためには、5フィートの鏡の移動が必要である。その他にもまた、物理的な制約や短所がある。長い遅延が使用されているときには、ミスマライメントやビント外れは、計測を歪ませる。コーナーキューブ反射器を使用すると、ミスマライメントの問題は軽減されるが、ビント外れの問題は軽減されない。このビント外れの影響は、走査振幅が光ビームの共焦点パラメータのかなりの部分に相当する時に起きやすい。10 nsの時間遅れは、10フィート(約3m)の自由空間での伝播を必要とする。それゆえ、ビント外れの影響を最小限に抑えるためには、共焦点パラメータ( $Z_R$ )はおおよそこの値(10フィート)の10倍、すなわち $Z_R = 30$ mでなくてはならない。このため、1550 nmの波長では12 mmのビーム半径( $w_0$ )が要求される。これでは多くの場合に非現実的に大きいものになってしまう。

【0003】鏡を大きく移動させることの必要性は、遅延線を何度も通過すること(マルチパッシング)により、低減される。(例えば、遅延線のダブルパッシングによれば、必要とされる鏡の移動距離を半減させることができる。)しかしながら、これによっても、ビント外れの問題は軽減されない。マルチパッシングでは、アライメント作業がより複雑になり、光学的な損失が増えるといった独自の問題が生じてしまう。

【0004】しかし、走査率(スキャニングレート)および走査周波数に関する別の制限は、同時に解決することができる。進行中の計測の「リアルタイム」ディスプレイを得るために、素早く(30 Hzより上で)走査する間に平均して信号を送ることが、多くの場合望ましい。それでも、このように高い走査周波数では、走査範囲は限られてしまう。これまでに達成された走査範囲の最高記録は、走査FPS法(Kwong et al.)を用い、100 Hzのレート(走査率)で100 ps(ピコ秒)である。走査範囲およびまたは走査周波数をこれ以上いくらかでも増加させると、高レベルの振動が発生してしまい、レーザーの動作が成り立たなくなってしまう可能性がある。回転しているガラスブロックは、この振動問題を防ぎ、より高い走査速度を出す能力を持っているが、走査範囲を全く調整することができない。さらに、これら(回転ガラスブロック)は、群速度の分散の変動をもたらすので、100 fs未満の幅のパルスに使用するのとは不適当である。

【0005】物理的遅延に加えて、機械的な動きを全く必要としない時間的な走査方法が導入されている。例えば、以下のようなものがある。

・自由走査レーザー(A. Black, R. B. Apte, and D. M. Blom, Rev. Sci. Instrum. 63, 3191(1992); K. S. Giboney, S. T. Allen, M. J. W. Redwell, and J. E. Bowers, "Picosecond Measurements by Free-Running Electro-Optic Sampling," IEEE Photon. Tech. Lett., pp. 1353-5, Nov. 1994; J. D. Kafka, J. W. Pieterse, and M. L. Watts, "Two-color subpicosecond optical sampling technique," Opt. Lett., 17, pp. 1286-9, Sept. 15, 1992(以下 Kafka et al. と略記); M. H. Ober, G. Sucha, and M. E. Fermann, "Controllable dual-wavelength operation of a femtosecond neodymium fiber laser," Opt. Lett., 20, p. 195-7, Jan. 15, 1995)。

・分散要素として音響光学デフレクター(偏向器)を採用しているステップミラー遅延線(R. Payak, S. Hunter, J. E. Ford, S. Essner, "Programmable ultrashort optical pulse delay using an acousto-optic deflector," Appl. Opt., 34, No. 8, pp. 1445-1453, Mar. 10, 1995)。

・二つのモードロックレーザー間のRF位相のねじれ(D. E. Spence, W. E. Sleat, J. M. Evance, W. Sibbett, and J. D. Kafka, "Time synchronization measurements between two self-modelocked Ti:sapphire lasers," Opt. Comm., 101, pp. 286-296, Aug. 15, 1993)。

【0006】これらの非機械的な方法によれば、とりわけ高速走査が可能である。これらの自由走査レーザーでは、レーザーの反復周期全体にわたるスパン(幅)が得られる。例えば、図1に示す公知の自由走査レーザーシステムは、互いに異なるキャビティ長を持っているマスターレーザー-1およびスレーブレーザー-2を有



し、両者10、20は互いに異なる反復周波数 $\nu_1$ および $\nu_2$ でパルス列を生成する。その走査周波数は、周波数差 $\Delta\nu = \nu_1 - \nu_2$ に等しいので、スレーブレーザー20のキャビティ長を所定の長さに調整することにより所望の値に設定される。相関器(コリレータ)40は、二つのレーザーの間の相互相関から信号を生成する。これからこの二つのレーザーの間のタイミングに関する情報が得られ、データ取得電子装置50にトリガー信号が与えられる。例えば、Kafka et al.によれば、二つの独立なモードロック・チタン:サファイア・レーザー、つまりマスターレーザー10およびスレーブレーザー20(それぞれの公称反復率は80MHz)が、(80MHz程度の)互いに異なる反復周波数を持つように設定された。反復周波数のオフセットに起因して、およそ100kHzのオフセット周波数 $\Delta\nu$ で、互いを通して走査した。このオフセット周波数は、ローカルRFオシレーターに対して安定化され得る。レーザー反復率が80MHz付近であったから、裁定走査範囲は約13nsであった。それゆえ、機械的に動く遅延線を全く使用することなく、時間走査が達成された。タイミングの較正は、非線形結晶(例えば相関器40)の中へ鏡30から反射された二つのレーザービームの相互相関により達成された。結果として得られた信号は、トリガーデータ取得ユニット50(例えばオシロスコープ)へ送られて使用された。レーザー10、20からのレーザービーム出力もまた、別の鏡60で反射され、レーザービームを使用した所望の計測や実験を行う計測装置70により受信される。

【0007】この技術の最大の欠点は、次の二つの理由によりデータ取得時間が極めて長くなることである。

1. 固定された走査範囲: 走査範囲が、レーザーの反復周波数(すなわちラウンドトリップタイム)の逆数に固定されている。
2. 無駄時間: 13nsのパルス空間の全部の代わりには、100psだけとか10psだけとかに關心が流れがらである。それゆえ、1.0μs(マイクロ秒)ある走査時間のうち、ほんの1% (または0.1%)しか活用されておらず、残りの99%(99.9%)は「無駄時間」である。そのため、データ取得時間が100倍とか1000倍とかに増大する。

【0008】Kafka et al.は、これらの制限に言及しており、もっと高い反復率(例えば、 $\nu = 1\text{GHz}$ )のレーザーを用いればこれを部分的に回避することができる。しかしながら、たいへん多様な走査範囲が要求される多くの応用のためには、この解決策は受け入れ難い。例えば、半導体のポンプアブソープ計測は、しばしば多種多様な時間範囲にわたって行われる。半導体のキャリア(すなわち電子および正孔)の寿命は数ナノ秒のオーダーであり、1GHzのレーザーは全く受け入れられない。なぜなら、次のパルスが届く

ときにも、以前のレーザーパルスによる残留キャリアが依然として存在しているからである。それと同時に、極端に高速なダイナミクスを見るために、もっと狭い時間スケールにズームインすることが望ましいことも、しばしばある。それゆえ、自由走査レーザー技術には、多くの応用で要求される走査範囲の柔軟性が欠けている。極端に長い取得時間がわからずに広い時間的なダイナミックレンジを得るための方法は、タイミング調整を粗くも細かくもできる柔軟性を持つことである。

【0009】関連する研究で、レーザーが能動的にモード同期している場合にも受動的にモード同期している場合にも、あるいは受動モードロックレーザーと能動モードロックレーザーとの組み合わせの場合にも、二つのモードロックレーザーの間でタイミングを安定化させるために、数種類の方法が使用されてきた。同期化のために使用された方法は、大きく分けて(1)受動光学的方法と(2)電子的安定化との二つのタイプに分かれる。最も高い同期精度は、二つのレーザーを光学効果を通じて干渉させる受動光学的方法によって達成される(J.M.E. vams, D.E. Spence, D. Burns, and W. Sibbet; "Dual-wavelength self-mode-locked Ti:sapphire lasers." Opt. Lett., 13, pp. 1074-7, Jul. 1, 1993; M.R.X. de Barros and P.C. Becker; "Two-color synchronously mode-locked femtosecond Ti:sapphire laser." Opt. Lett., 18, pp. 631-3, Apr. 15, 1993; D.R. Dykaar and S.B. Daraik; "Sticky pulses: two-color cross-mode-locked femtosecond operation of a single Ti:sapphire laser." Opt. Lett., 18, pp. 634-7, Apr. 15, 1993 (以下Dykaar et al.と略称); Z. Zhang and T. Yagil, "Dual-wavelength synchronous operation of a mode-locked Ti:sapphire laser based on self-spectrum splitting." Opt. Lett., 18, pp. 2126-8, Dec. 15, 1993)。これらの光学効果(例えば相互位相変調等)は、一パルス幅(100フェムト秒未満)以下に同期される二つのレーザー間での強固なモード同期を発生させる。これらは最も正確な同期化をもたらすものの、レーザー間の時間遅れは強固に固定されている。そのため、これらの間の時間遅れを走査するためには、通常の物理的な走査遅延方法を使用せざるを得ない。

【0010】単純なRF位相検知を使用した電子的安定化によれば、相対的な時間遅れを調整する上で最も柔軟性が得られ、しかし現時点ではこれらのシステムは、2~3ピコ秒より良好なタイミングの正確さを維持することができない。このようなシステムは、外部の参照周波数に合わせてTi:サファイア・レーザーを安定化させたり、二つのモードロックTi:サファイア・レーザーの同期を取るために、市販されている(スベトラフィジックス Lock-to-Clock/TNシステム)。パルス光学位相同期ループ(POPLL)を使用すれば、100フェムト秒より良好な安定化が達成さ

れる。これはハイブリッド光学電子の方法であって、ディジャリ等の文献（S.P.Dijaili, J.S.Smith, and A.Dienes, "Timing synchronization of a passively mode-locked dye laser using a pulsed optical phase locked loop" Appl.Phys.Lett., 55, pp.418-420, Jul.1989,以下Dijaili et al.と略称）に開示されている。同文献では、電子安定化回路が、光学的相互相関器からのタイミング誤差信号をもたらし、しかしながら、この方法は、受動的な方法としての同じタイミング調整の同期（ロック）を欠いている。タイミングの調整は、一つのパルス極未済でのみ可能である。それゆえ、POLL法を使用するに際して、一つのパルス幅より少しでも大きく相対パルスタイミングを偏向したい場合には、一つのレーザービームの中にある種の物理的な遅延線を押入することが必要になるであろう。

【0011】もしもレーザー固有のタイミングジッターが低減されるのであれば、RF法によるタイミング安定化の性能を向上させることができるであろう。二つのレーザーができる限り同一の環境条件に置かれることにより、固有のレーザージッターのある程度の低減が可能である。スティックパルス・レーザーは、Dykaar et al.に開示されているが、Ti:サファイア・レーザー結晶の空間的に分けられている二つの領域をポンピングするために、空間的に分割されたレーザービームを採用している。これには、二つの分割されているレーザーが、エンドミラーを除いて同じポンプレザー、レーザー結晶、空気の空間、およびその他のキャビティ内の要素のほとんどを共有していることが不可欠である。このようにすれば、二つのレーザーは、同じ温度変動、ポンプレザーのノイズ、および騒音を経験するので、反復率のジッターにおける差異が最低限に抑制される。こうすれば、たとえ二つのレーザー間での光学的干渉が弱くても、複数のパルスを一緒に同期（ロック）することができる。「環境的カップリング」の一般的な原則は、モードロック・ファイバーレーザーを含む他の形式のレーザーにも適用可能である。しかしながら、Dykaar et al.の目的は二つのレーザーを一緒にロックすることであり、本発明の目的とするところでは好ましくないことに注意すべきである。なぜならば、この時間遅れは走査できないからである。すなわち、前述のスティックパルス・レーザーの二つのカップリングされたレーザーからのタイミングパルスは、光学的カップリングを通して一緒にロックされるものであり、独立に制御することはできないからである。

【0012】

【発明が解決しようとする課題】本発明の一つの目的は、たとえば「マスター」レーザーおよび「スレーブ」レーザーのように、光学要素の大きな機械的な動きを必要とすることなく、パルス反復周期 $T_R$ の連続していかようにも選択されるサイクリックでの操作を可能と

する、二つのモードロックレーザーの間での時間遅れを急速に走査（スキャン）するための方法および装置を提供することである。これは、二つのレーザー間での平均タイミング（位相）を連続的にモニターする電子のフィードバック回路を使用している間に、一つのレーザー（たとえばスレーブレーザー）のキャビティ長をミクロン単位で適正に調整することにより達成される。なお、データ取得の衝撃係数（デューティサイクル）が大きく改善されるように、反復周期のいくつものサブインターバルにわたって、自由走査法とは異なり相対時間遅れが走査されるよう、二つのレーザーのRF安定化を改造（モディファイ）することが望ましい。

【0013】本発明のもう一つの目的は、振動や空気の乱れ、温度変化などの環境条件の変動により生じるタイミングジッターを、最小限に低減することである。これは、二つのレーザーを独立に制御できるようにしながら、同一の容器内で同一の要素を使用して、同じポンプレザーでポンピングされるように、両方のレーザーを構成することにより達成される。とりわけファイバーレーザーの場合には、同じ軸（スプール）に二つのファイバーと一緒に巻き付けることにより、これは達成される。

【0014】本発明のさらにもう一つの目的は、上記走査方法および上記走査方法の組合に使用されるように、サブピコ秒の精度をもって走査時間スケールを校正する方法を提供することである。例えば、一つのレーザー（例えばマスターレーザー）からのパルスを、部分反射する光学要素のシリーズを通して別のレーザー（例えばスレーブレーザー）からの通過パルスによって得られるパルスシーケンスに対する相互相関を取る（クロスコレートする）ために、本発明は使用することができる。

【0015】

【発明の実施の形態および実施例】本発明の実施例は、複数の図面を参照してより詳細に以下に記述されており、これらの図面には明細書と同一の符号が付されている。

【高速走査法の原理】本発明は、自由走査レーザーシステムと同様に、例えば図2(a)に示すようにほとんど同一の反復率をもつマスターレーザー110およびスレーブレーザー120の二つのレーザーから構成されている。しかしながら自由走査レーザーシステムとは異なって、マスターレーザー110およびスレーブレーザー120からのパルス出力は、互いを通して走査することはできないようになっている。むしろ、波長 $\lambda_1$ をもつマスターレーザー110は、一定の反復率 $\nu_1$ に保持されているが、自発的にドフトするが容認されている一方で、スレーブレーザー120の反復周波数 $\nu_2$ は、マスターレーザー110の反復率の付近を動揺（デイズ）させられている。この反復率の動揺は、例えば30 Hzから1 kHzまでの範囲の「高」周波でスレー

ブレーザー120のキャビティ長 $(L_2)$ を変えることによって達成されている。その一方で、その「平均的」反復率は、走査周波数未満の帯域幅の「低速」位相同期ループ(PLL)回路を含む安定器ユニット130により、マスターレーザ110の反復率に合わせて追従なし制御されている。マスターレーザ110とスレーブレーザ120との間の平均的な時間遅れは、スレーブレーザ120のキャビティ長を制御する安定器ユニット130により、一定に保持されている。一方、二つのレーザ間の瞬時の遅れを走査するために、信号発生器140からの高速動揺信号出力は、安定器ユニット130からの制御電圧出力と(合算器5)で足し合わされている。反復周波数の追従および動揺は、スレーブレーザ120のエンドミラーをピエゾ素子(PZT)121に取付け、周波数信号発生器140からの必須の電圧信号を(PZT)に印加することにより、実現することができる。PLL回路の帯域幅は動揺周波数未満であることが必要であり、さもないと、(スレーブレーザ120の周波数が)マスターレーザ110に追従しようとしてキャビティ長の走査を妨害してしまうであろう。

【0016】図2(b)は別の実施例を示しており、この実施例ではマスターレーザ110もPZT111を装置して、両レーザ110、120が共にPZT111、121によりそれぞれ制御されるエンドミラーを有している。この場合には、マスターレーザ110が走査周波数で動揺させられており、スレーブレーザ120はマスターレーザ110の「平均的」反復率を追従(トラック)している。マスターレーザ110のキャビティ長は信号発生器140により急速に動揺させられており、安定器ユニット130はスレーブレーザ120を所望の平均的時間遅れに固持している。

【0017】繰り返すが、PLL回路がタイミング走査と干渉しないために、PLL回路の帯域幅は動揺周波数が凌駕していることが必要である。キャビティ長の走査がどう作用するかを説明する一例として、スレーブレーザ120のPZTに対して走査周波数 $f_s$ の矩形波を印加する。すると、キャビティ長のミスマッチは、次の数1の時間の関数で急速に変動する。

【0018】

$$\text{【数1】 } \Delta L(t) = \Delta L_0 \cdot S_q(f_s t)$$

ここで、 $\Delta L_0$ は矩形波の移動量の振幅であり、 $S_q(x)$ は矩形波関数である。これにより、走査サイクルの半分毎に正負の線形走査遅れが生じる(三角波)。安定している場合には、 $\Delta L$ だけの一定のキャビティ長のミスマッチが、次の数2のオフセット周波数を生じる。

【0019】

$$\text{【数2】 } \Delta \nu = -c \Delta L / (2L^2)$$

または書き改めて、

$$\Delta \nu / \nu = -\Delta L / L$$

しかしながら、高速走査法においては、キャビティ長は十分に高い周波数で動揺させられるので、(両レーザ)のハルスは互いにすれ違う可能性はない。すなわち、走査周波数および振幅は、次の数3の条件を満たす。

【0020】

$$\text{【数3】 } f_s \gg \Delta \nu$$

または

$$f_s \gg c \Delta L / (2L^2)$$

この場合には、時間変動する時間遅れ $T_d(t)$ は、次の数4に示すように、キャビティ長のミスマッチの時間積分に比例するであろう。

【0021】

【数4】

$$T_d(t) = \frac{2}{c T_1} \int_0^t \Delta L(t') dt'$$

または

$$T_d(t) = \frac{2}{L} \int_0^t \Delta L(t') dt'$$

【0022】ここで、 $c$ は真空中の光速であり、積分期間は走査サイクルのオーガーにある。図3(a)は矩形波変調の例を示しており、周囲では1kHzの矩形波が二つのレーザのうち一つのPZTに印加されている。

図3(a)~(c)に示されている波形は、時間に依存しているキャビティ長のミスマッチ $\Delta L(t)$ およびその結果として生じる瞬時の時間遅れ $T_d(t)$ を、各種の動揺波形がスレーブレーザ120のPZTに印加される際の時間の関数として示している。瞬時の反復率 $\nu_2$ は、 $\nu_1$ の周波を動揺しており、相対的な時間遅れは時間に関して線形に前後に走査している。合計走査範囲は基本反復率 $\nu_1$ または走査周波数 $f_s$ に依存しており、走査振幅は次の数5に従う。

【0023】

$$\text{【数5】 } T_{\text{max}} = (\Delta L / 2L) \cdot (1 / f_s)$$

またはオフセット周波数で表現して

$$T_{\text{max}} = (\Delta \nu / 2\nu) \cdot (1 / f_s)$$

走査率は、(ミリ秒/ミリ秒)の単位で次の数6により与えられる。

【0024】

$$\text{【数6】 } R_{\text{scan}} = 2 \Delta L \nu / c$$

または

$$R_{\text{scan}} = \Delta L / L$$

あるいは研究室で使うのに便利な単位で、

$$R_{\text{scan}} = 10^8 \Delta L / L \text{ (ps/ms)}$$

「サンプリンググリッド」は、次の数7のラウンドトリップあたりの時間的なパルス進みから与えられる。

【0025】

$$\text{【数7】 } \delta t_s = 2 \Delta L / c$$

走査速度パラメーターを、1秒あたりの空間的なパルスの進みの総計として、次の数8に示すように定義することができる。

【0026】

$$\text{【数8】 } \nu_{scan} = (2\Delta L(t)) / T_R = (\Delta L(t)) / L \cdot c$$

走査率、サンプリンググリッド、および走査速度の概念は、自由走査（フリー・スキャン）レーザーにもまた適用可能であることに注意されたい。一例を挙げると、公称キャビティ長が $L=1.5\text{ m}$ のレーザー対により、 $\nu_1=100\text{ MHz}$ が得られる。もし $\Delta L=15\text{ }\mu\text{ m}$ の走査振幅を仮定すると、 $\Delta\nu=1\text{ kHz}$ のオフセット周波数、 $R_{scan}=10^4\text{ ps/ms}$ 、および $\sigma t_g=100\text{ fs}$ が結果として得られる。もしキャビティ長が動揺させられないと、フルパルス・ウォークオフが $1\text{ ms}$ で起こる。したがって、もし $15\text{ }\mu\text{ m}$ の走査振幅が

使用されると、トータル・ウォークオフを防ぐためには $f_g > 1\text{ kHz}$ の走査周波数が必要である。

【0027】表1～3には、 $10\text{ MHz}$ 、 $100\text{ MHz}$ 、および $1\text{ GHz}$ の反復率をもつモードロックレーザーについて、いくつかの可能な走査範囲、走査率、および各種走査速度パラメーターの関数としてのサンプリンググリッド・インターバルが記載されている。表3から、 $1\text{ GHz}$ のレーザーについて、実際の走査条件の大半においてトータル・ウォークオフが生じていることが分かり、それゆえに時間遅れは $1\text{ ns}$ を超えることができない。したがって、反復率が $1\text{ GHz}$ 未満のレーザーでは、本発明の動揺方法が自由走査レーザ方法として望ましい。

【0028】

【表1】

10 MHz レーザー ( $L=1.5\text{ m}$ ) に対する走査速度パラメーター

走査周波数 $f_g$ (Hz)	$\Delta L$ ( $\mu\text{ m}$ )	オフセット 周波数 $\Delta\nu$ (Hz)	走査率 (ps/ms)	グリッド (fs)	走査速度 (m/s)	走査範囲 (ps)
10	0.15	1	10	1	3	50
10	1.50	10	100	10	30	500
10	15.00	100	1000	100	300	5000
100	0.15	1	10	1	3	5
100	1.50	10	100	10	30	50
100	15.00	100	1000	100	300	500
1000	0.15	1	10	1	3	0.5
1000	1.50	10	100	10	30	5
1000	15.00	100	1000	100	300	50

【0029】

【表2】

100MHzレーザ ( $L=1.5m$ ) に対する走査速度パラメータ

走査周波数 $f_s$ (Hz)	$\Delta L_s$ ( $\mu m$ )	オフセット 周波数 $\Delta \nu$ (Hz)	走査率 (ps/ms)	グリッド (fs)	走査速度 ( $\mu/s$ )	走査範囲 (ps)
0.1	0.15	10	100	1	30	500
0.1	1.50	100	1000	10	300	5000
1.0	0.15	10	100	1	30	50
1.0	1.50	100	1000	10	300	500
1.0	15.00	1000	10,000	100	3000	5000
10.0	0.15	10	100	1	30	5
10.0	1.50	100	1000	10	300	50
10.0	15.00	1000	10,000	100	3000	500
100.0	1.50	100	1000	10	300	5
100.0	15.00	1000	10,000	100	3000	50

【0030】

【表3】

1GHzレーザ ( $L=0.15m$ ) に対する走査速度パラメータ

走査周波数 $f_s$ (Hz)	$\Delta L_s$ ( $\mu m$ )	オフセット 周波数 $\Delta \nu$ (Hz)	走査率 (ps/ms)	グリッド (fs)	走査速度 ( $\mu/s$ )	走査範囲 (ps)
0.1	0.15	1	1000	1	300	*
0.1	1.50	10	10,000	10	3000	*
1	0.15	1	1000	1	300	500
1	1.50	10	10,000	10	3000	*
1	15.00	100	100,000	100	30,000	*
10	0.15	1	1000	1	300	*
10	1.50	10	10,000	10	3000	500
10	15.00	100	100,000	100	30,000	*
100	0.15	1	1000	1	300	5
100	1.50	10	10,000	10	3000	50
100	15.00	100	100,000	100	30,000	500

【0031】注：表3中の\*は、トータル・ワークオフ（最大で1ナノ秒）を示す。

対称形の矩形波が唯一の望ましい方法と言うわけではない。図3(b)および図3(c)は、矩形波変調に加えて別の二つの動揺方法（スキーム）を示している。単方向の走査を得るために、図3(b)に示すように方形波（非対称な矩形波）を使用することもできる。こうすれば、後方への走査の無用の無駄時間を低減することができるであろう。無指向性走査が市販のファブリ・ペロー干渉計で使用されているとは言え、図3(b)に示す方形波によるよりも、むしろ三角波で（無指向性走査を）実行している。

【0032】矩形波および方形波の前縁および後縁での電圧の急変は、機械的なショックとPZTの浮き上がりを起こしかねず、それゆえ異なる走査の繰り上げ時間スケールを歪ませることになる。これらの影響を低減するような信号条件の何らかのタイプ（例えば遷移のスムージング）が望ましい。あるいは、図3(c)に示すように、正弦波電圧をPZTに印加しても良い。正弦波走査の利点は、矩形波や方形波にある鋭い電圧遷移に関連して起こるショックや浮き上がりを避けることができることである。また、誘起されたキャビティ長のミスマッチに反応しようとするPLLによるタイミングの歪みをもさけることができる。すなわち、単純なアナログ安定化回

路にとって、たとえ走査時間遅れに対してなにがしかの反応をこの安定器がしても、正弦波駆動電圧は正弦波的な走査特性をもたらす。これらの理由により、正弦波走査が実施上もつとも単純である。しかしながら、正弦波走査では、図3(b)に示すように単方向の走査を生じる方形波のつ利点は得られない。それゆえ、単純さが求められる度合いに応じて、正弦波走査でPZTを駆動するのが望ましくなる。

【0033】表1-3中の走査速度パラメータは、PZTの対称形の矩形波変調に基づいて得られている。正弦波走査では、走査範囲および走査率が若干変わるであろう。時間に依存する遅れは依然として前述の数4で求められるが、キャビティ長の変調は次の数9により与えられる。

$$[0034] \quad \Delta L(t) = \Delta L_0 \cdot \cos(2\pi f_s t)$$

その際の遅れは、次の数10で与えられる。

$$[0035] \quad T_0(t) = (\Delta L_0 / L) \cdot (1/2\pi f_s) \cdot \sin(2\pi f_s t)$$

以上のようにして正弦波走査(の特性)が求まる。ただし、PZTの位置に対して時間遅れは90度になる。この場合、走査特性は線形ではなく、ある種のスケール補正が必要であることに注意された。

【0036】ここに記載されているレーザ走査技術は、一対のモードロック・ファイバレーザを使用して実証されているが、この技術は前述の二つの実施例に限定されるものではなく、むしろソリッドステート、ダイオードレーザ、およびダイレーザを含むモードロックレーザの多くのタイプに適用可能である。

「走査ファイバレーザシステム」図4に、二つのファイバレーザすなわちマスターレーザ210およびスレーブレーザ220を採用している本発明の好ましい実施例を示す。

【0037】両レーザ210、220は、同じレーザダイオードLD 205によってポンピングされており、両レーザダイオードのパワーはスプリッターSPL 206により二つのレーザへと分割されている。マスターレーザ210は、ファラデー回転子(旋光器)ミラーFRM 215によって終端が形成されている。一方、スレーブレーザ220は、光学アセンブリPZT-FRM 225によって終端が形成されている。これはFRM 215とはほぼ同じであるが、ミラーがPZT上に取り付けられている点が異なる。二つのファイバレーザ210、220は、同一のモード同期光学系(すなわち波長板 $\lambda/4$ 、 $\lambda/2$ 、ファラデー回転子FR、および偏光ビームスプリッタPBS)を構成要素としている。レーザモード同期は、飽和吸収器SAによって始動される。両レーザ210、220の低

雑音出力ポートからの出力パルスは、それぞれフォトダイオードPD-1、PD-2によって検知される。両フォトダイオードは、駆動安定器130によって使用される。

【0038】両ファイバレーザ210、220は、 $\nu_0 = 4.629 \text{ MHz}$ の公称反復率を持っている。これらは、ファーマン等の文献(M.E.Fernan, L.M.Yang, M.L.Stock, and M.J.Andrejco, "Environmentally stable Kerr-type mode-locked erbium fiber laser producing 360-fs pulses," Opt.Lett., 10, pp.43-5, Jan.1994)に開示されている。同文献では、モード同期機構として非線形偏光エヴォリューション(NPE)が使用されている。両レーザ210、220は、ファラデー回転子ミラーを除いて、同一の構成要素を持っている。すなわち、マスターレーザ210は、シングルパッケージのファラデー回転子ミラーFRM 215で終端が形成されている。一方、スレーブレーザ220は、FRMと同一ではあるがミラーがPZT上に取り付けられている分離した構成要素であるアセンブリPZT-FRM 225によって終端が形成されている。ここで使用されているPZTは、全移動行程が40ミクロンのものである。両レーザ210、220は、同じファイバースプール280と一緒に巻き付けられることにより、熱的および力学的にカップリングされている(同一状態に保たれている)。そのうえ、両レーザ210、220は、同じボンプレッシャーダイオードLD 205によってポンピングされているので、二つのレーザ内のボンブノイズは相関している。両レーザ210、220間の相対的なタイミングは、PLL回路を含む安定器130によって設定され安定化されている。ひとたび安定器130が稼働し両レーザ210、220が適正な遅れに設定されると、走査させるようにスレーブレーザ220のPZTに駆動信号が印加される。駆動信号は、信号発生器135により印加され、PZTを駆動するための信号を生成するために、安定器130からの安定化信号出力に加えられる。あるいは、安定器130の出力が安定化信号および駆動信号の両方を含んでいるようにして、安定器130から駆動信号を発生させても良い。いずれのレーザ210、220も、キャビティ内の偏光器に関連した二つの出力ポートをそれぞれ持っている。これら二つの出力ポートは、図4中に各PBSの二つの出力として図示されている。これら二つのレーザ出力は、互いに極めて異なった雑音特性を持っている。すなわち、一方はいくぶん雑音があり、他方はほとんど雑音がない。これは、この種のレーザに起こることが知られている(NPEに起因する)光学限界効果のゆえである。安定化回路130への入力を生じるフォトダイオードPD-1、PD-2によって検出されるのは、この静かな出力ビームである。安定化回路130への入力として静かな出力ビームを使うことは、タイミングジ

ターを最小限に抑制する助けになる。

【0039】正弦波時間走査は、このツインファイバーレーザーシステムを使用したインバーターによって達成される。図5は、図4に示した二つのファイバーレーザー210、220の間の相互相関走査(クロスコリレーション・スキャン)の二サイクルを正在している。この相互相関走査は、平均化なしの単発のデータ取得により収集されたデータである。より詳しくは、走査周波数106Hz、走査範囲200ピコ秒における本発明の動描方法により走査させられている二つのファイバーレーザー210、220間の相互相関信号を、図5は示している。ここで、図5はフルに二サイクルの走査を明示しており、前進走査(フォワードスキャン)および後退走査(バックワードスキャン)を示している。併せて、PZT制御器に印加されている正弦波電圧と、矩形波として現れている信号発生器135のトリガー出力とが図示されている。図5のプロットは、二つのレーザー210、220からのパルスを、非線形結晶すなわちバリエリウム・ボレート(BBO)結晶内での合計周波数混合(サム・フリークエンシー・ミキシング)を使用した実形相互相関器を通して得られたものである。

【0040】走査の機械的な遅延(遅れ、ディレイ)は、公知の相関器(コリレーター)の一枝(ワンアーム)の中で使用される。しかしながら、本発明の相関器では、機械的な遅延は使用されていない。全ての走査は、前述のレーザー動描法によって行われている。また図5には、PZT制御器に印加されている正弦波電圧と、信号発生器135からのトリガー出力とが図示されている。数9および数10から予想できるように、グラフ上にマークされたPZTの移動端は、印加された正弦波から90度だけ位相が外れていることに留意されたい。走査範囲は、走査周波数100Hzで約200ピコ秒である。これは、反復率100Hzでの3cmの物理的な遅延と等価である。しかし、このツインレーザーシステムでは、これと同じ走査範囲が、スレーブレーザー220のPZTをほんの2〜3ミクロンだけ動かすことにより達成されている。

【0041】この相互相関法は、二つのレーザー210、220間のタイミングジッターを計測するために使用された。タイミングの較正は、20ピコ秒だけ分離されたパルス列を作り出す厚さ2mmのガラスエタロンを相関器の一枝に挿入することにより、行われている。これらのパルス列は、図5中の走査上で明瞭に視認できる。図6は、同じ走査を引き伸ばした時間スケールで図示している。同図から、2mmのガラスエタロンを相関器の一枝に挿入することによって生成されたごく近傍に間隔を空けている二つのパルス(一つのレーザーはサテライトパルスを持っている)と、この一対のパルスの複製とが見て取れる。この一対のパルスは、エタロンの光学的厚さに対応している20ピコ秒だけ、主たる(メイ

ン)パルス対(ついで)から離れている。ここで、パルス幅は1ピコ秒のオーダーにあり、またサテライトパルスは2〜3ピコ秒だけメインパルスから離れて存在している。したがって、RMSタイミングジッターは、 $\pm 20$ ピコ秒までの状況によるタイミングの偏差を伴って、 $\Delta T_j = 5$ ピコ秒と測定された。タイミングジッターのデータは図7に示されており、同図では各データポイントが、走査率106Hzでの各レーザー210、220の走査間の相対的な時間遅れを表している。この計測されたジッターは、安定器130の電子的PLL回路の精度の限界を例示していると共に、これだけのジッターにもかわらず如何に精密にタイミングの情報が得られるかを例示している。もし走査が十分に急速に行われるのであれば、走査時間内の相対的なタイミングジッターは、極めて小さくすることができる。そして、例えばレーザーパルスをエタロンに通ずることにより、もし安定なタイミングパルス列が得られるのであれば、走査時間の間のジッターさえも正確に知ることができる。このようにして、レーザーに数ピコ秒のジッターがありながらも、走査特性はサブピコ秒の精度で明らかになる。

【0042】一緒にパッケージ(コ・パッケージング)された複数のレーザーの効用は、重大である。以前に本発明者により組み立てられたあまりうまくないデュアルレーザーシステムでは、同様の一対のレーザーが異なる基台(ブレッドボード)上に別々に汲み上げられており、異なるレーザーによってボンベングされていた。安定器を使用しても、PZTの移動範囲の40ミクロンをキャビティ長とのミスマッチが超える前に、そのスレーブレーザーがマスターレーザーに追いついたのは、わずかに30分程度であった。この(ミスマッチが40ミクロンを超える)時点で、追いつ(トラッキング)は不可能となった。それゆえ、正常な室温の下であっても、5MHzレーザーの一対の間でのキャビティ長のミスマッチのドリフトは、大半のPZTの可動範囲である40ミクロンを容易に超えてしまった。

【0043】これは対称的に、本発明の一緒にパッケージされたシステムは、無期限に追従することができるので、正常な室内状態の下でPZTによる40ミクロンの制限内にキャビティ長とのミスマッチが発生し留まっていることを示している。周波数ドリフトの絶対値の計測と相対値の計測によれば、二つのレーザー210、220の間の相対的な周波数ドリフトは、一つのレーザーの絶対的なドリフトの7分の1程度に小さいことが分かる。相対的なドリフトは、製作上で二つのレーザーを真に同一に作ることににより、さらに小さく改善することができる。これは、両レーザー210、220の終端を同一のPZT-FRMアセンブリで形成することによるか、または両レーザー210、220の終端を同一のFRMパッケージで形成し、スレーブレーザー220のキャビティ長をファイバー・ストレッチャーで変更する

ことにより、達成することができる。

【0044】相対的タイミングドリフトおよび絶対的タイミングドリフトの両方をさらに低減するには、ファイバースプール280および他の構成要素を消音して、同じ容器内に二つのレーザーを構成すると良い。こうすると消音されるし、温度も制御される。つまりとて、前述の各方法の全てを用いて、相対的タイミングジッターは量子限界にまで達した（H.A.Haus and A.Necozzi, "Noise of mode-locked lasers," IEEE J. Quantum Electron., QE-29, pp.983-996, March 1993）。量子限界によるタイミングジッターは、分散（ディスパージョン）の増大に伴って増大するので、分散ゼロの波長の付近でモードロックレーザーを動作させることにより、ジッターはさらに低減されるであろう。

【0045】モードロックレーザーのエンドミラーを動揺させることにより、ミラーのミスアライメントとビント外れとのせいで、走査周波数における振幅の変動が誘起される。ミスアライメントの作用は、角度の感度を減らすようにPZTミラーに焦点を結ばせることにより、また、市販のファブリペロー干渉計でできるがアライメントを保つように三点ミラー走査PZTを用いることによって、最小化される。ビント外れの影響は、PZTミラーのビーム無射入射（ビーム・ウェイスト・インシデント）の共焦点パラメータに対し、走査振幅が許容できる程に小さいときに、発生しうる。ファイバレーザにおいて、このビント外れは、ファイバー内に戻ってくるビームの干渉効率（カップリング・エフェシエンス）の減少を起し、今度はパワーの変動を起す。それゆえ、PZTミラーの焦点深度が浅いこと（タイト・フォーカシング）は、望ましくないことである。ビームの視準（コリメーション）の賢明な選定により、このビント外れの影響を低減することができる。例えば、もし0.4mmの走査範囲を持つPZTを使用すると、共焦点パラメータは少なくとも2~3mmは必要であろう。そこで、 $Z_R$ がPZTミラーでのビーム・ウェイストの共焦点パラメータであるとして、 $(\Delta L/Z_R)^2$ の量がおおよそ $10^{-4}$ であるというのはかなり小さい。この量が小さければ、レーザーの振幅変動はこれに伴って小さい。

【0046】たとえもしミラーの軽度のミスアライメントが走査中の振幅にいくらかの変動をもたらしたとしても、ファイバーの導波特性（ガイディング・プロパティ）の故に、ビーム指向性（ポインティング）の安定性はいささかも減退しない。しかしながら、ソリッドステート・モードロックレーザーを使用した場合には、もし出力ビームの偏差の発生を防止するように計画が行われないならば、いくらかの出力ビームの偏差が生じる可能性がある。

【0047】変形態様のレーザーシステムとして、同一のFRMで両レーザーの終端が形成されていても良く、

またキャビティ長がPZTファイバー・ストレッチャーにより調整されるようになっていても良い。このようなビエゾセラミックチューブ・アクチュエータ（PIT 40×18×1）は、ドイツのビエゾメカニクス株式会社により製造されている。

【0048】【タイミング校正】PLL回路安定器130が相対的時間遅れの平均値を安定化していても、この位置は数ピコ秒だけ変動することがあり、それゆえ、例えば100フェムト秒程度 of the 所望の精度をもつタイミング信号で、データ取得ユニット50が適正にトリガーされることが補償されていることが必要である。このような信号は、BBOのような非線形結晶内での非線形光学ミキシングを採用している相互干渉器から得られる。このようなことは、前述の実施例で行われており、Kafka et al.のようなその他の人によっても行われている。走査時間遅れのためにミラーシェーカーを使用する場合にも、この種のトリガリングは、度量衡計測において高精度を得るためにも必須であることが示されている。

【0049】しかしながら、これは必要条件ではあっても十分条件ではない。ジッターの計測によれば、タイミングの変動は、走査と走査との間で発生するばかりではなく、単一の走査の間にも生じていることが明らかになっている。すなわち、走査率 $F_{scan}$ は、走査と走査の間で変化するばかりではなく、走査サイクルの中でさえも変動する。それゆえ、走査の動作が信号平均化よりも「前に」起こることが必須である。したがって、相關器からの走査毎に「少なくとも」二つのタイミングパルスがあることが必要である。この二つのタイミングパルスのうち、一方はトリガリングのためであり、他方は時間スケール情報のためである。これを行うのに、本発明は、（振幅と時間との両方において）一様なパルス列でも非一様なパルス列でも、走査インターバルを満足することができる。このようにすれば、各走査サイクルの各々における走査インターバルに関して、タイミング情報を得ることができる。

【0050】【タイミングスケールの発生】時間スケールの較正で重要なキープポイントは、タイミング情報を発生させるのに使用するように、光学的方法を選択することである。好ましい実施例においては、図6(a)~(b)に示すように、多数のパルスの列を時間的に一様に生成するよう、高度に精妙（フィネス）なファブリペロー（FP）エタロンから単パルスを反射することにより、パルス列を生成することができる。なぜならば、このFPエタロンは「ガタガタ板」として使用されており、その中ではFPエタロン（すなわち高度に精妙なエタロン）内でパルスが何度も内部反射されるからである。ここではむしろ共振特性が使用されており、透過率はむしろ低い。

【0051】一例として二つのミラーからなる $R=98\%$ の反射率のFPエタロンを採用したとすると、その透



過率は $T=0.0004$ である。この例について今から説明する。透過したパルス列は、図8(a)に示すように、FPEタロンの通過時間により分離されている一連のパルスであり、ミラー損失およびミスマライメントに依存している減衰率により弱まって立ち上がっている。すなわち、送信されたパルス列は、Tをエタロン表面の透過率として $T^2$ のファクターにより減衰する。送信されたパルス列には、パルス強度がラウンドトリップ毎にゆっくりと弱まるが、多少れ少なかれ一様性がある。パルス列中の第1の(かつ最大の)パルスは、FPEタロンに入射するパルスに比べて2500分の1に弱まっている。

【0052】図9および図10は、表面の反射率が $R=98\%$ でありミラーの間隔が約1mmの實際にエアギャップがあるFPEタロンを通して送信されたパルス列が、ゆっくりと減衰していく様子を示している。図10は、引き伸ばした時間軸上に、17パルスを持つ単一の後退走査(バックワード・スキャン)のプロットと、走査の終端に対応する点とを示している。これらのデータは、単に、ヴォイスコイル(スピーカー)上に取り付けられたリトロフレクターを採用している通常の走査相関器の一枚に、FPEタロンを挿入することにより得られたものである。スピーカーには正弦波電圧が印加されたので、時間遅延は、いくらか正弦波的な仕方而走査されている。パルス間の時間的な間隔により、図11(a)に示すように、シェーカーミラーの走査特性が得られる。総走査範囲(トータル・スキャンレンジ)は、これらのデータから次の数11に従って算出される。

【0053】

【数11】  $T_{tot} = \sim (17 \text{パルス}) \times (6.7 \text{ピコ秒/パルス})$

図11(a)に示すデータは、予期されたように、走査特性が正確に線形ではないことを示している。線形性からの偏差を示すために、このデータは直線でフィッティングされ、そしてこのデータはこのベストフィット(の直線)から減算された。その結果を図11(b)に示すように、時間走査特性は線形性からの偏差を有する。

【0054】反射されたパルス列は、図8(b)に示すように、最初の表面反射でありパルスエネルギーの大半(すなわち98%)を含んでいるプロンプトパルスによって減少していること以外は、送信されたパルス列と同一である。この最初に反射されたパルスが強度の大半を占めているので、どのような試験的な応用や計測を行うにも便利である。このプロンプトパルスの強度は、プロンプトパルスの直後に続くパルス列の強度の2500倍であることに留意されたい。ほとんどの場合、この弱いパルス列は計測に影響することはない。しかしながら、それでも受け入れがたい場合もあり得るであろう。

【0055】もちろん、微妙さの低いエタロンを使用

することもできるが、そうすると送信されるパルス列の減衰がもっとずっと急速になり、この相関器のダイナミックレンジが限定要素になってしまう。例えば、表面の反射率が $R=30\%$ のエタロンを使用すると、各パルスが直前のパルスよりも10分の1に弱くなって急激に減衰する一連のパルスが発生する。それゆえ、ほとんどのデータ取得装置においては一度の測定で三桁のダイナミックレンジであるので、リアルタイムの校正にはたったの三個程度のパルスしか使えない。これは、図5〜7に示す相関の場合であった。例えば対数アンプを使用するなどのダイナミックレンジ圧縮スキームによって、この影響はある程度まで除去することができる。

【0056】さらに別の実施例では、FPEタロンの組み合わせを使用することができる。例えば、(カバースリップのような)薄いエタロンによれば、極めて近接したパルス(〜1ピコ秒)の対が発生させることができ、これをもっと間隔が広く(例えば20ピコ秒)より高度に微妙なFPEに送ることができるであろう。その結果、一連の20ピコ秒おきのパルス対が得られるであろう。これにより、タイミング特性に関するローカルで派生的な情報が得られる。

【0057】上記FPEタロンは、固形(ソリッド)でも空間型(エアスペース)でも構わない。ソリッド・エタロンはもっとどこでもコンパクトであるが、エアスペース・エタロンは調整可能でパルスの広がりを選べることができる。ここで、パルスの広がりには、エタロンを透過して多数回のラウンドトリップをしてきたパルスに起こる現象である。高精度を得るためには、エタロンの温度を制御することが必要である。例えば、融けたシリカの一片を透過して起こる群遅延(グループ・ディレイ)の機能的な変化は、近似的に $\Delta 1/1 \sim 10^{-8}^{\circ}\text{C}$ である。それゆえ、もし1ミクロン(6フェムト秒)の精度が全長1m(6ナノ秒)の範囲で要求される場合には、エタロンの温度は $1^{\circ}\text{C}$ 以内で一定にすべきである。エアスペース・エタロンには、温度補償取付け技術を使用して構成できる点で利点がある。したがって、ソリッド・エタロンの温度感度は低減することができ、正常な室温での作動にも温度制御は必要ないかもしれない。

【0058】その他にも実施可能なものとしては、図12(a)に示すように、光ファイバー300上に形成された光反射率の異なる一連のファイバー格子310を使用するものがある。これらの格子310は、一様にも非一様にもパルス・シーケンスを調うように製作することができる。この場合には、間隔(スペーシング)は一様であるが、同図に示す如くパルス毎または10パルス毎に大きなパルスが生じる「規則的な(ルーラー)」スケールを形成するように、その振幅は非一様である。もちろん、ファイバー300内であれば所望の位置にどこにもファイバー格子310を形成することができることは、たいへんに融通性に富んだことであり、格子31

0を非一様に配設することは、タイミングの曖昧さを取り除く上で有利であろう。

【0059】そのうえ、もしファイバー300の実長をパルスが通過するようにしたいのであれば、ファイバー300内での群速度分散(GVD)によってパルスが広がってしまう。そこで、通過すべきファイバー300のGVDが適正に補償されるようなやり方で、チャープ格子310を形成しても良い。実際にも、ノーマルなチャープのない格子では反射帯域幅がほんの2nm程度しかないで、サブピコ秒のパルスに対しては不安定になってしまう、高精度の時間分解能を得ようとするればチャープ格子が必要である。中央波長800nmの100フェムト秒パルスは、半値全幅(FWHM)帯域幅が8nmである。そして波長1500nmでは、帯域幅は約30nmである。これらのパルスに対しては、チャープ格子だけが充分に応じ帯域幅を持っている。

【0060】チャープ格子からのフェムト秒の反射パルスは、それらのパルス自身が広がっておりかつチャープされていることが知られている。この場合には、図12(b)に概要を示すように、チャープの方向が互いに逆の二つのチャープ格子320、330からのパルスを連続的に反射することが必要である。ここでは、パルスは、まず最初にチャープ格子シーケンスCFGS 320から反射され、続いて反対向きにチャープされたほとんど同一のチャープ格子310から反射されるという補償スキームを使用することにより、パルスの拡大(ブロードニング)が防止されている。この順番は逆にしても(すなわちCFGの次にCFGSの順で反射されても)、同様の結果が得られる。偏光ビームスプリッタPBS 340により、また1/4波長板QWP 350によって、有効な分割(スプリッティング)および反射がもたらされる。

【0061】この技術は、ガルバナスカス等によるファイバー内でのチャープパルス増幅に応用されて成功を取めている(A. Galvanauskas, M.E. Fermann, K. Sugden, and Bennion, "All-fiber femtosecond pulse amplification circuit using chirped Bragg gratings," Appl. Phys. Lett., 66, pp. 1053-5, Feb. 27, 1995)。しかしながら、本発明のこの見地での目的は、ガルバナスカス等のそれとは異なっている。彼らの研究では、チャープパルス増幅のために光パルスを非常に長い持続時間(>300ピコ秒)に引き伸ばすためと、そしてそのパルスを再び圧縮するために、一對の格子が使われている。本発明では、チャープされていない格子は短パルスをサポートするのに帯域幅(〜1nm)が不十分であるので、また、ファイバーの実長を横切るパルスに対してファイバーのGVDを補償する必要性がいくらか生じるであろうからという理由で、チャープ格子が使用されている。ここで、本発明のこの見地での目的は短パルスのシーケンスを発生させることであるから、パルスを引き伸ばさ

うという要求はない。

【0062】二つのファイバー格子は、透過にも反射にも使用可能なファイバーFETアロンを形成するためにも使用できる。あるいは、受動的光ファイバーループを使用しても良い。反射を越える他の構造は、ファイバー内の光ファイバーとマイクロバンドとの接合が不十分である。これらの場合には、温度制御が必要であろうし、タイミングの厳正のバリエーションは前もって知ることができ数学的に予測されるであろう。

【0063】パルス列は、物理的に可能であれば、所望のパルス列が得られるように注意深く選ばれた各ミラーの反射率および間隔により、部分的に反射する一連のミラーによってもまた、生成が可能である。単一のパルスから所望のパルス列を生じるために必要なミラーパラメータを計算するためのアルゴリズムがすでに開発されている(V. Narayan et al., "Design of multirail structure for high-frequency bursts and codes of ultrashort pulses," IEEE J. Quantum Electron. QE-30, p. 1671-1680, July 1994)。単一のパルスからパルス列を生成するためにも使用できる部分レフレクターからなる光学デバイスは、その他にも数々ある。

【0064】任意にプログラムすることができるパルス列は、パルスシェーピング分散遅延線(DDL)にレーザパルスを通すことによって生成できる。これによれば、前述の方法よりもずっと大きな柔軟性が得られるが、しかし達成しうる最大のパルス間隔の点で限界がある。実際上の限界は、およそ100〜200ピコ秒である。パルス間隔をこれよりいくらかでも大きくしようとすると、物理的に大きな装置が必要になり、法外に高価なものになってしまう。

【0065】波長が1550nm付近の低い反復率(30MHz以下)のレーザに最も有用な別の実施例は、ゲイン・セクション(例えばERドープされたファイバー)のあるファイバーループからなる再生ソリトン保存リング内に、パルス列を注入するためのものである。このリング内に注入されたパルス列は、ここで説明した方法を含むいろいろな方法で得られるであろう(例えば、ファブリペロー・エタロン、ファイバー格子、パルスシェーパ、その他)。このループは再生的であるので、各レーザパルスについてダンピングすることと再注入することが必要である。これは、5MHzのレーザでは200ナノ秒毎に起こるのである。ダンピングおよび注入は、AO(音響光学的)であってもEO(電気光学的)であっても、市販のある種の光スイッチで達成されうる。

【0066】ただし、別の実施例は、間値(スレッシュホールド)またはその付近にまでバイアスされたレーザダイオードに、単一のレーザからの複数の短パルスを注入するためのものである。レーザダイオードの複数の小面は、30%の反射率を持ち、精妙さが低いFDPエ

タロニを形成している。しかしながら、このレーザダイオードの利得は、光パルスの「リングダウン」を阻止しないし防止するであろう。このようにして、数十のパルスからなるパルス列を得ることが可能になろう。実際に、このダイオード中での群速度分散および利得の狭まり(ゲイン・ナローイング)は、その精造を通して多数回のラウンドトリップをするパルスを広げてしまい、それゆえに実際に使用可能なパルスの数を制限してしまうことになろう。このデバイスは、反射にも透過にも使用することができる。

【0067】特別に細かい(サブミクロンの)較正は、その計測システムの一つのビーム内に複屈折結晶(例えば水晶)を挿入して、その結晶の常軸および異常軸に沿って伝搬するパルスの到着時刻を比較することによってなされる。1mmの典型的な板厚では2〜3波長分のリターデーションを生じ、そのリターデーションにより、100フェムト秒以下の持続時間のパルスが使用されるならば容易に認められる違いを生じるであろう。

【0068】[相互相関光学系] 前述の方法によって生成されたパルス信号列は、ある種の実線形要素を使用して、別のレーザパルスと相互相関を取ることができる。パルスの同時性や相対的なパルスタイミングを検出するためには、各種の実線形プロセスを使用することができる。使用可能な各種の実線形性としては、二次調和発生(SHG)、総和周波数発生、利得飽和、吸収飽和、四波混合、および光電流があるが、これらに限定されるものではない。実線形要素のありそうな選択としては、SHG結晶がある。しかしながら、SHG結晶を使用すると、レーザパルス間にオーバーラップがあったときにしか信号が発生しないという短所がある。それゆえ、これは同時性の検出器としてしか使用できない。そういうわけで、前述のパルス列発生器、パルスシェーパ、エタロン、その他の各種を使用することが必要になる。ある状況においては、SHG結晶の使用によって得られる非常に高い精度には必要がない。ある場合には、非即時の応答を持つ(「遅延」)情報を介して時間遅れに関する情報が得られる要素を使用することが、より望ましいこともある。トランスリニアリゼーション・レーザダイオード増幅器(TWA)や飽和吸収器や光検出器などの適切なデバイスや材料、あるいはPINフォトダイオードやアバランシェ・フォトダイオードあるいはSEEEDデバイスなどのように飽和作用で中継するデバイスなどは、数多くある。例えば、RTAなどは、光通信の中で光学時計のリカバリーに使用されてきている。これら(TWA)は、十分に飽和状態に駆動されると、振幅の変動に比較的鈍感になる。ここで、その精度と範囲とは、そのデバイスの回復時間(リカバリータイム)によって決まる。TWAデバイスは、 $10^{-3}$ ラジアン程度までの位相精度で計測ができることが分かっている。このような光電子デバイスでは、光学的吸収の実線形性だけ

がタイミング情報をもたらす唯一の方法ではない。そのデバイスを通してパルスが伝搬していくにつれて変化するそのデバイスの光電流や電圧、電気容量などの電気的な特性を観測することによってまた、パルスタイミング情報が得られる。光学的特性の変化を検出するに当たり、これは大きな単純化である。

【0069】これらのタイミング較正技術は、高速走査レーザ法と共に使用するようにしているとはいえ、ここに述べられたレーザ走査システムだけにとは限らず、自由走査レーザ、二重波長モードロックレーザ、および物理的な遅れを採用している通常の走査システムにさえも、応用できると期待している。その一例としては、図9〜11に示されている較正データがある。このデータは、ヴォイスコイル(スピーカー)上に取り付けられたリトロフレクターからなる走査システムから取得された。そのスピーカーに正弦波電圧が印加されているから、その時間遅れは、いくらか正弦波的な調子で走査された。図11(a)に示す走査特性は、走査中に取得されたどんなデータも時間スケールの修正にも使用することができる。そのアクチュエータがもっと大きな振幅で駆動されると、その走査特性は明らかに正弦波的に偏差を生じる。これもまた、修正可能である。回転しているガラスブロックや回転ミラーなどのような他のデバイスでもまた、ここで説明された本発明のタイミング法によって修正可能な実線形走査特性を持っている。

【0070】[レーザ安定化] いかなるキャビティー長の誤差もレーザキャビティのラウンドトリップ毎にコンスタントに蓄積されるので、非常に小さなキャビティー長の変動であっても大きなタイミング誤差を生じうる。それゆえ、サーボループを使って、「時間平均」反復率を $\mu$ に、または等価であるが「時間平均」キャビティー長ミスマッチ $\Delta L$ をゼロに保持することが必要になる。平均キャビティーミスマッチを制御するために使われるフィードバック信号は、図13に示すように、一対の光検出器PD-1、PD-2によって検知され、通常の位相同期ループ(PLL)回路に導入される。以前に説明したように、このようなPLL安定化システムの精度は、すでに計測されており、20ピコ秒までの最大タイミング移動で5ピコ秒以下のRMSに、二つのファイバレーザを同期させることができることが分かっている。ここに引用されている安定化の精度は現在の技術水準によるものであって、絶対的な達成可能限界を示すものではない。本質的には、1ピコ秒未満まで精度を向上させることが可能なはずである。しかしながら、場合によっては1フェムト秒以下にまでなる所望の時間分解能に達するとまでは、期待されていない。この理由により、ここで説明したタイミング較正法は、依然として必要である。

【0071】図13に、好ましい実施例として、安定器

130を含むレーザ安定化動揺システムの詳細な模式図を示す。安定器130は、タイミング弁別装置TD131、132、位相検出器133、フィルタ134、直流電圧発生器135、アンプ136、周波数発生器140および加算器137を含んでいる。パルスアンプ(PA)430、440は、それぞれ光検出器PD-1、PD-2からの電気パルス出力を受け取る。パルスアンプ430、440は、これらの受け取った電気パルスを増幅して、タイミング弁別装置TD131、132にそれぞれ出力する。タイミング弁別装置TD131、132は、その信号が位相検出器133に入力される前にその信号を整える。PZT制御装置450には、ここでは市販のPZT制御装置を使用している。高電圧アンプは、1~10Vの範囲の入力信号を取り込み、これに比例した0~150Vの範囲の出力を生成する。PZT制御装置450は別ユニットとして図示されているが、安定器130内に統合してしまってもでき、その方が望ましい。

【0072】安定器130のこの好ましい実施例においては、PLLのための位相検出器133は、標準的なRF位相検出器が、線形性が悪いXORゲートのような混合器(ミキサ)でよい。ラウンドトリップ時間のどんなサブインターバルの走査を行おうとする場合にも、線形性は非常に重要である。あるいは、時間遅延コンパクター(TAC)を位相検出器133として使用しても良い。これらまた線形性がとても高く、5MHzなどという低い反復率においては特に適当であろう。高度に精密な位相安定性の一つの限界は、単純なRF混合器の中で起こり得るAMからFMへの変換(コンバージョン)である。すなわち、この混合器によって、レーザの振幅の変動がタイミングの変動へと変換されてしまうのである。それゆえ、光ダイオードPD-1、PD-2によって生成された電気パルスに対し、信号調整(シグナルコンディショニング)を行うことが望ましい。こうすれば図13に示すように、位相検出器133の前のタイミング弁別装置131、132により、最も容易に行うことができる。しかしながら、レーザの振幅雑音を低減することによってもまた、この影響は最小化される。ある条件下のモード同期作動の間に、レーザのある出力ポートに対して、光学的制限プロセスが起こることが知られている。これにより、安定器130が作動する場合に、タイミングジッターを大幅に低減することができる。

【0073】安定化システムの帯域幅よりも走査周波数が大きいこともまた、重要である。このため、PLLは平均時間位置を適正に維持するが、適用されたミラー走査を妨害することはない。前述のツインファイバーレーザは、たった30Hzの帯域幅のPLL回路を使用して安定化されていた。このずいぶん低めの帯域幅には、走査率の範囲を30Hzから数千Hzに至るまでの範囲

で設定できるという利点がある。30Hzの安定器の帯域幅を使用しながら10ピコ秒未満の精度で同期を維持し続けるためには、一対のレーザの固有の相対的タイミングジッターは極めて低くなければならない。これは、以前に説明した構成の方法を使用して達成される。その方法とは、可能な限り大きな範囲で同じ環境条件に二つのレーザを置くことを確実にするものである。

【0074】安定化のために必要なフィードバック信号を、単純な相関器で生成することもまた可能である。レーザが走査している間に、相関器により計測されるピーク位置を、安定器130にフィードバックする誤差信号として使用することもできる。本発明においてはレーザがコンスタントに走査しているので、Dykaar et al.の単純な静的相互相関器の技術はここではうまく行かないことに留意された。

【0075】本発明の高速走査システムは、多くの点で通常の走査物理遅延や自由走査レーザに勝っている。とりわけ、可動アーム(ムービング・アーム)を持つ通常の走査物理遅延とは異なり、走査に数ナノ秒の大きな遅れが生じた場合にも、本発明ではレーザビームにミスマイメントやビント外れが起こらない。物理的遅延では、アラインメントは非常に注意深く行わなくてはならず、共焦点パラメータは1ナノ秒の遅延線に対して1mより大きくなければならない。そのうえ、本発明によれば、音速を超えることもできる高速走査速度が可能である。しかし物理的遅延では、100Hzで1ナノ秒(100フィート毎秒)の走査さえおぼつかない。それなのに本発明によれば、大きな(調整可能な)走査範囲が実施でき、例えば5MHzのファイバレーザで約50ピコ秒から200ナノ秒に至るまでの範囲での走査が可能である。このような走査範囲を通常の走査システムで達成するには、200フィートの遅延線が必要であろう。また、通常の自由走査システムと同様に、よりよい循環係数(デューティサイクル)のために高反復率のレーザを採用する必要がある。

【0076】さらに、大きな時間的ダイナミックレンジが可能であり、これは離れた目標の走査やOTDRをする上で有用である。例えば、1フェムト秒未満の時間分解能を持ち総走査範囲が $T_{\text{sc}} = 200 \text{ナノ秒}$ であれば、 $10^8$ の時間ダイナミックレンジが得られる。また、通常の自由走査システムとは異なって、無駄時間が大幅に減っており向上した循環係数が達成されている。さらに今や本発明によれば、可動部品を一切必要とせずに、極めて単純でコンパクトな相互相関器の設計が化のである。例えば、この相関器は、ゲームボーイ(商品名)のサイズにすることもできる。そのうえ本発明では、行程の長さがマッチしている必要がないので、実験のセットアップは極めて単純になる。

【0077】前述の高速走査および校正の方法は、多種多様な計画や実験を行うために使用することができる。

本発明の方法および装置を使用できる2〜3の応用について、以下に説明する。しかしながら、当業者であれば、本発明は多くの応用に適用でき、以下に説明する応用に限定されるものではないことが、容易に理解できるであろう。

【0078】図14は、本発明による、FPエタロンを使用しているタイミング校正方法及び高速走査レーザシステムとを採用している一般的な計測システムの好ましい実施例を示す。レーザ510（レーザ510がマスターレーザであるかスレーブレーザであるかは不問）は、FPエタロンに入射している。FPエタロンを通過して発射されたパルス列は、タイミングユニット540に送られ、レーザ520からの単パルスと相互相関を取られて、校正された時間スケールを与え一連のデータ（データストリーム）が発生する。上記エタロンから反射されたパルス列は、レーザ520からの単パルスに沿って計測ユニット（図略）に送られる。この計測ユニットから上記一連のデータは、データ取得システム（DAQ）550の「Yチャンネル」に入力され、一方、タイミングユニット540からの一連のデータは、DAQ 550の「Xチャンネル」に入力される。この情報には、次の異なる二つの用途がある。

【0079】1. 飛行時間スケール修正：この技術では、タイミングパルスは時間スケールを形成する。例えば、もし正弦波走査が使われるなら、一様なパルスシーケンスでもっと時間において非一様性を表す。高速プロセッサであれば、信号平均化以前の正確な時間スケールで（補間法を用いて）適正に定数データを調整するために、この時間スケール情報を使用できるであろう。

【0080】言い換えれば、タイミングパルスにより形成された時間スケールに基づいて高速プロセッサによって、各走査点が修正されるのである。例えば、図11(a)は、図10に示してある走査の各ピークに対する走査特性を示しており、そして図11(b)は、これらの点の線形性からの偏差を示している。この時間スケール情報はこの偏差の修正に使用され、「飛行中」の各ビームを本質的に修正することができる。

【0081】2. 走査の排除（賢明なトリガリング）：この技術は、トリガパルスと相対的に上手に定義された所定の時間スロット内で起こるたくさんの（少なくとも二つの）タイミングパルスを探す「走査選択器（スキューンセクター）」を使用する。この選択器は、信号平均化器に入る走査データの合計をするか否か（ゴー/ノーゴー）の決定をする。相関器からのタイミングパルスがこの時間スロットにはより込むと、現在のデータバッファに走査を合計する。逆にもしタイミングパルスがその時間スロットを「ミス」した場合には、その走査は排除される。信号の平均化が済んだ後、時間スケールのいかなる非線形性も適正に補償することができ。

【0082】この賢明なトリガリング法は、実施するに最も単純なものであるが、多くの走査が無駄になってしまう。飛行中スケール修正はもっと洗練されており、走査の無駄から言えばもっと効率的ではあるが、もっと計算負荷が大きい。したがって、応用での制限がどちらの技術を使うかを決めることになる。

【表面計測システム】さらに明確な応用の一例として、図15および図16に示すように、通常の動ミラー法の代わりに本発明の高速レーザ走査技術を採用している表面計測システムの好ましい二つの実施例がある。

【0083】図15は、表面計測システムの実施例を示す。同実施例では、スレーブレーザ620からのビームは、タイミングユニット641に入力されるパルス列を発生するFPエタロンに入射する。マスターレーザ610からのビームは、普通のビームスプリッターBS 660によって分割される。スレーブレーザ620の分割されたビームの一方は、タイミングユニット641に入力される。同ビームの他方は検査される表面に向けられ、同表面で反射される。反射されたビームは相関器640に入力される。同様に、FPエタロンから反射された単パルスも相関器640に入力される。したがって、相関器640は計測されるべき目標物（供試体）のために使用され、タイミングユニット641は時間スケール校正のために使用される。相関器640からの出力である目標物に対応しているデータストリームは、DAQ 650のYチャンネルへ入力される。そして、また相関器を含むタイミングユニット641から出力されたデータストリームは、DAQ 650のXチャンネルへ入力される。Xチャンネルに入力されたタイミングユニットデータは、時間スケールをもたらす。そして、相関器640から出力されYチャンネルに入力されたデータからは、目標物表面の距離情報が得られる。

【0084】図16は、本発明の複数の技術を採用している表面計測システムの別の実施例を示す。同実施例では、タイミングデバイス（FPエタロン）は、目標物のビーム経路の中に挿入されている。FPエタロンから反射されたビームは、計測すべき目標物を照射する。目標物表面から散乱する光は、レンズL1によって単光され、FPエタロンを通過した校正済みのパルス列と（ビームスプリッターBS 670を介して）再結合される。スレーブレーザ620からのゲートパルスと目標物およびエタロンからのパルス列との間の結果として得られる相互相関からは、このエタロンからの複数パルス・タイミングスケールに重畳された目標物までの距離情報（単一パルス）が得られる。この結果は単一データストリームであって、これには目標物までの距離情報と時間スケール校正との両方が含まれている。さすれば、目標物表面上の一点までの距離は、データストリーム中のタイミングパルスと目標物パルスとの間の相対的時間遅れを計測することによって推定される。目標物パ

ルスとエタロンパルスとの間のこの比較は、短パルスを用いた差分計測法の一変形である。

【0085】図15および図16では、FPエタロンは入力ビームに対して鋭角で対向しているように図示されている。この入射角は、明瞭にするために誇張されている。FPエタロンを垂直入射から傾けていくと、図8(a)に示すように、このエタロンからの一連の反射光が横にずれる量が増えていくことが、当業者にはお分かりになる。したがって、入射角を実現可能な限り小さくしてFPエタロンを使うことが望ましい。もしFPエタロンの前に偏光子およびファラデー回転子があれば、垂直入射角での使用も可能である。この空間的なずれは、相関器640、740のレンズや他の開口からはみ出さない限りは、同相関器の性能を損なうことはない。

【0086】あるいは、この横ずれの影響は、急激な劣化とは異なった何かであるパルス列の包絡線の形を変えて、なにがしかの利点を生じることもあり得る。このようなことは、ビームの光量を介してか、または相関器内の非線形混合結晶の位相マッチング条件の角度の選択可能性により、起こりうるであろう。

【OTDRシステム】図17は、本発明の高速走査レーザおよびタイミングシステムを採用している光学時間領域反射率計(OTDR)システムの模式図である。走査レーザシステムは、使用可能な明瞭な範囲が広がるように、低い反復率のレーザ(〜5MHz)からなることができる。マスターレーザ710からの短パルスは、ビームスプリッタBS 760により二つのビームに分割される。分割されたビームのうち一方はタイミングユニット741に送られる。他方はファイバーなどの導波供試デバイス(DUT)790に送られる。DUT790内の表面や接続部、欠陥などから反射されたパルスは、約10フェムト秒すなわち約3ミクロンの精度での精密なタイミングないし距離の計測のために、相関器740に送られる。これは、次のような方法で実現される。

【0087】すなわち、スレーブレーザ720からの単一パルスは、二つのビームに分割される。それらのビームのうち一方は、ファイバーからの信号のためのゲーティングパルスとして使用されるために、相関器740に送られる。その他方は、データ取得(DAQ)ユニット750のために校正された時間スケールをもたらすために、次にそれはそれ自身が別の相関器であるタイミングユニット741によって使用されるパルスシーケンスを生成するパルスシェーパ780に送られる。5MHz( $T_R = 200\text{ns}$ )程度の低い反復率のシステムのためには、パルスシェーパ780は、200ナノ秒のタイミングインターバル全体をだいたい満たすパルスシーケンスを生成しなければならない。この好ましい実施例では、パルスシェーパは、図12(b)に示すようなチャープ・ファイバブラッグ格子を利用して構成でき

るであろう。

【0088】このレーザの変形態様としては、タイミングユニットおよび相関器が使用可能である。例えば、マスターレーザ710の役とスレーブレーザ720の役とは、交換可能である。パルスシェーパとしては、ファイバーFPエタロンまたは(受動でも利得ありでも)ファイバロープが使用可能である。

【EOサンプリング・オシロスコープ】図18は、本発明の高速走査レーザおよびタイミングシステムを使用した、ジッターなしの電気光学サンプリング・オシロスコープの模式図である。本実施例では、十分に確立されている非接触EOサンプリング技術が、ここで説明された高速走査技術と組み合わせられており、時間スケールの調整にかなり大きな柔軟性がもたらされている。

【0089】マスターレーザ810からのパルスは、二つのビームに分割される。一方のビームはタイミングユニット841に送られ、他方のパルスは供試デバイス(DUT)上に電気パルスを発生させるために送られる。この場合、供試デバイスは、光導電(PC)スイッチ891を介して、集積回路(IC)上に取り付けられている。スレーブレーザ820からのパルスもまた、二つのビームに分割される。一方のビームは、電気光学(EO)プローブチップ892に送られ、他方のビームは、パルス列を生成するパルスシェーパ880に送られる。このパルス列は、時間スケールの校正のために、次にタイミングユニット841に送られる。EOプローブチップ892から返ってきたパルスは、DUTからの電圧とEOプローブチップ892との間の干渉によって変調されている。これらのパルスは、偏光光学素子893によって検出され、DAQ850のYチャンネルに送られる。したがって、精密タイミング校正が、図17のOTDRのために説明したのと同じようにして得られる。

【0090】時間遅れ、走査インターバル、および走査周波数は、安定器830によって所望の値に設定することができる。例えば、もし(走査範囲ではなく)走査周波数を二倍に増加させたいならば、スレーブレーザ820内の変調周波数を倍にして、対応する量だけPZTの定電圧を増大させる必要がある。それに比べ、走査周波数を変化させないで走査範囲を増大させるには、単純にPZTの定電圧を増せばよい。時間掃引範囲(タイム・スウィープレンジ)の相対遅れは、安定器830の位相制御によって調整される。時間スケールの調整のこの柔軟性は、通常のオシロスコープの遅れ時間ベースによって与えられるものと同等である。

【0091】この目的のために、光導電性サンプリングを使用することもまた、同様に可能であろう。こうすればずっと高い感度が得られるが、時間分解能は約2ピコ秒までに限られる。短レーザパルスおよび走査遅れの最も広く使用される応用は、ずっと物理、化学、または

電子システムのポンプ・プローブ計測であった。しかしながら、この技術のための応用範囲は急速に広がっており、この技術が科学市場を越えて商品になることは今にも起こりそうなことである。ここに説明された高速走査および時間較正の技術は、超短レーザーパルスを利用するとほとんど全ての応用に使用可能である。なぜならば、これらの応用の事実上全てが、レーザーパルス間の時間遅れの調整を何らかの形式で必要としているからである。これらの応用は、半導体材料および半導体デバイスの分野での超高速電子/光電子デバイスのチャージ・ダイナミクス特性の電気光学試験や、光信号処理光導電サンプリング、および各種各様の時間分解ナノメーター・プロービングなどに適用でき、またこれらに限定されずに広く応用可能である。

【0092】したがって、テラヘルツ・イメージングを含むこれらの走査方法が応用できるテラヘルツ・ビームのための新しい応用は、数多く開発中である。その一例としては、フー等の文献(B.B.Hu et al., "Imaging with Terahertz Waves", OpticLetters, Vol.20, No.16, August 15, 1995, pp.1716-1719)により開示されているものがある。最近では、超高速光検出器が市販されるようになり、そのスピード(50 GHz, 10 ps FWHM)は、市販のオシロスコープ(例えばPicometrix製の Newport Corp. Model 8PX-D7)の計測能力を遙かに凌駕するものである。ピコ秒レーザーおよび走査遅れは、これらの検出器のスピードの利点を最大限に引き出すために必要である。そのうえさらに、本発明の走査方法は、その走査範囲の選定の非常なる優越性のゆえに、サブミリの分解能のレーザーレーダーおよび目標物のリモート・プロファイニングに特に適当である。その走査範囲調整の柔軟性により、高速走査システムをオシロスコープの可調整時間ベースと相似にすることができ。

【0093】ここで説明された高速走査方法によって達成される非常に高い走査率によれば、新しい潜在的な応用をたくさん実施可能にすることができる。走査速度パラメーター(表1〜3参照)は、特別に利用価値がある長所の象徴である。表1〜3の走査速度は、3 m/sから30, 000 m/sにまで範囲が及んでいることに留意されたい。それゆえ、自由走査技術でも高速走査技術でも超音速の走査速度が可能であるから、例えばレーザーに誘起される固体中および液体中の音響効果および光弾性効果などの研究や応用で、本発明は潜在的に利用価値がある。このような応用では、通常の走査方法を使用するのは実際的ではない、というのは、通常の走査方法では物理的遅延システムの中で走査ミラーを音速で動かすことが必要であり、非現実的だからである。

【0094】本発明は、好ましい実施例を参照して説明されてきたが、これらの実施例に應用が限定されることはない。以上の開示と教唆から、本発明に対するその他

の変形態様やヴァリエーションがあることは、当業者にっては明白である。したがって、ここで取り上げて説明してきた本発明の実施例はほんのいくつかのであるが、本発明の思想および見解から離れることなく、なおその上に数々の変形が可能であることは明白である。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】 公知の自由走査レーザーシステムの構成を示す模式図

【図2】 本発明の高速走査レーザーシステムの構成を示す模式図

(a) スレーブレーザーのキャビティ長制御の場合の模式図

(b) 両レーザーのキャビティ長が制御される場合の模式図

【図3】 時間遅れ $T_d(t)$ と、レーザーキャビティ内のPZTに印加される電圧とを示す組図

(a) 印加電圧が矩形波の場合のグラフ

(b) 印加電圧が方形波の場合のグラフ

(c) 印加電圧が正弦波の場合のグラフ

【図4】 本発明のツインファイバーレーザーシステムの構成を示す模式図(同システムでは、両レーザーのファイバーは同じ軸に巻かれており、モード同期機構として非線形偏光展開(エヴォリューション)を使用する二つの同一のモードロック・ファイバーレーザーを使用。)

【図5】 本発明の動揺法により走査された二つのファイバーレーザーの間の相互相関信号を示すグラフ

【図6】 本発明の動揺法により走査された二つのファイバーレーザーの間の相互相関信号を示す拡大グラフ

【図7】 本発明の動揺法により走査された二つのファイバーレーザーの間のタイミングジッターを示すグラフ

【図8】 ファブリペロー・エタロンの作用を示す組図

(a) ファブリペロー・エタロンの作用を示す模式図

(b) 発射パルス列と反射パルス列との時間配列を示す概念図

【図9】 単レーザーパルスとエタロンを通ったパルス列との間の相互相関信号を示す全走査サイクル二つのグラフ

【図10】 単レーザーパルスとエタロンを通ったパルス列との間の相互相関信号を示す半走査サイクル分の拡大グラフ

【図11】 ファブリペロー・エタロンのピーク位置を示す組図

(a) ピーク位置の線形フィッティングを示すグラフ

(b) 線形フィッティングの偏差を示すグラフ

【図12】 光屈折性成長チャープファイバー格子の並びからなるパルス列ジェネレーターの構成を示す組図

(a) パルス列ジェネレーター単体の構成および作用を示す模式図

(b) 二つのパルス列ジェネレーターの組み合わせを示す模式図

【図13】レーザー安定化動揺システムの構成を詳細に示す模式図

【図14】本発明の高速走査レーザーおよびタイミング較正法を採用している計測システムの模式図

【図15】本発明の高速走査レーザーを採用している計測システムの模式図

【図16】本発明の高速走査レーザーを採用している計測システムの模式図

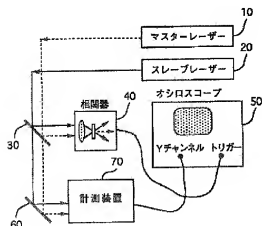
【図17】本発明の高速走査レーザーおよびタイミング較正法を採用しているフェムト秒OTDRシステムの構成を示す模式図

【図18】本発明の高速走査レーザーシステムおよびタイミング較正法を採用している電気光学サンプリング・オシロスコープの構成を示す模式図

【符号の説明】

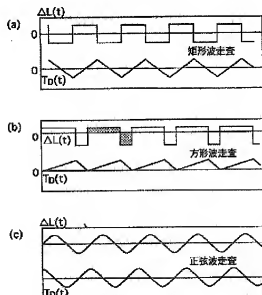
10、110、210、510、610、710、810：マスターレーザー  
20、120、220、520、620、720、820：スレーブレーザー  
30：ハーフミラー 40、640、740：相関器（コリレーター）  
50：オシロスコープ 60：ミラー 70：計測装置  
111、121：ピエゾ素子、ピエゾアクチュエータ（PZT）  
130、630、830：安定器ユニット、駆動安定器、PLL回路安定器  
131：タイミング弁別装置（TD） 133：位相検出器  
134：フィルター、濾波器 135：信号発生器

【図1】



136：オペアンプ 138：加算器（Σ） 140：低周波信号発生器  
205：レーザーダイオード（LD） 206：スプリッター（SPL）  
215：ファラデー回転子（旋光器）ミラー（FRM）  
225：光学アセンブリ（PZT-FRM） 280：ファイバースプール  
300：ファイバー 310、320、330：チャープ・ファイバー格子  
340：偏光ビームスプリッタ（PBS）  
350：四分の一波長板（QWP）  
430、440：パルスアンプ（PA） 450：PZT制御装置  
540：タイミングユニット、相互相関器  
550、650、750、850：データ取得システム（DAQ）  
641、741、841：タイミングユニット  
660、670、760、770：ビームスプリッター（BS）  
780、880：パルスシェーパー 790：供試デバイス（DUT）  
891：光導電（PC）スイッチ 892：電気光学（EO）アローブチャップ  
893：偏光光学素子  
L1：集光レンズ FP：FPEタロン FR：ファラデー旋光器  
PD-1、PD-2：フォトダイオード、光検出器  
SA：飽和吸収器  
λ/2：半波長板 λ/4：四分の一波長板（QWP）

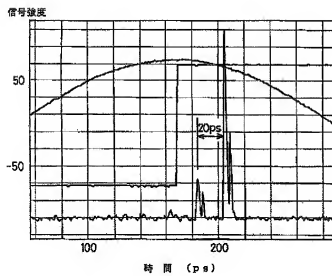
【図3】



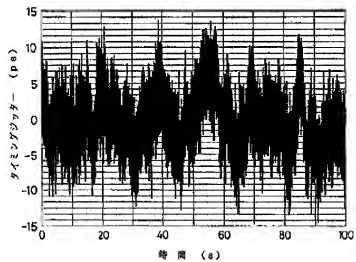




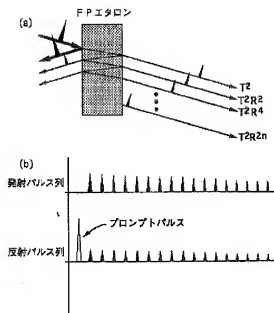
【図6】



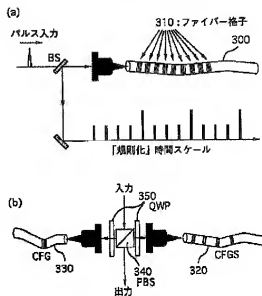
【図7】



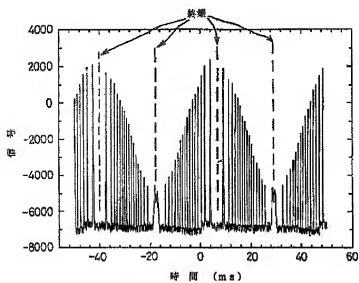
【図8】



【図12】

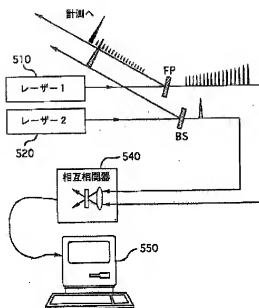


【図9】

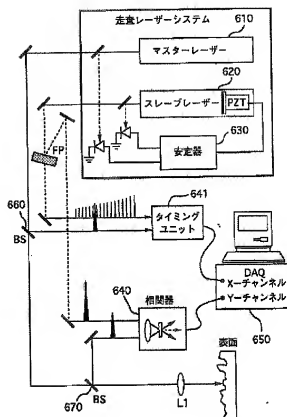




【図14】

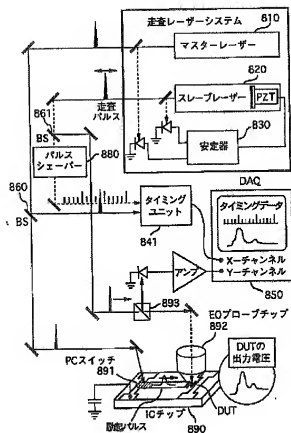


【図15】





【図18】



フロントページの続き

(72)発明者 ドナルド ジェー ハーター  
 アメリカ合衆国 ミシガン州 アンアーバ  
 ー サルグレイブ・プレイス3535番地

【発明の名称】

レーザパルス比較方法、高速レーザー走査方法、高速走査レーザー装置、短パルスレーザー装置、距離計測装置、電気光学サンプリング・オシロスコープ、短パルスレーザー安定制御方法および較正時間スケール発生装置